

# **Un enfoque multiescala en la cartografía y génesis de suelos yesosos de San Luis Potosí, México**

Tesis Doctoral

**Juan Felipe Martínez Montoya**



**Zaragoza, España, 2005**



# Universitat de Lleida

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària  
Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl

## Un enfoque multiescala en la cartografía y génesis de suelos yesosos de San Luis Potosí, México

Tesis Doctoral

**Juan Felipe Martínez Montoya**

Director

**Dr. Juan Herrero Isern**

Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria (C.I.T.A.)

Gobierno de Aragón

Tutora

**Dra. Rosa Maria Poch i Claret**

Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl



Zaragoza, España, 2005





## **Dedicatoria**

A mi familia.

A mi esposa Maricela y a nuestros hijos Octavio e Ilesie Nayelli. Gracias por convivir con mis vicisitudes y por sobrellevar resignadamente mis prolongadas ausencias debidas a mis estudios. Juntos recuperaremos el tiempo que no les puede dedicar en aras de la superación familiar, quizás por el momento ésta sea imperceptible.

A mi mamá y a mis hermanos. Gracias por el apoyo y ayuda que tuvieron para con mi esposa e hijos durante el tiempo que estuve lejos de ellos.

## Agradecimientos

### Instituciones

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** (CONACYT), por la asignación de la beca-crédito que me permitió realizar los estudios doctorales.

Al **Sistema de Investigación Miguel Hidalgo** (SIHGO-CONACYT), por permitirme usar parte de la información del proyecto 19980206039.

Al **Campus San Luis Potosí, Colegio de Postgraduados**, institución en la que laboro, por ser integrante del Subprograma de Formación de Profesores Investigadores (SPFPI), me fue posible realizar el programa de doctorado.

Al **Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria** del Gobierno de Aragón, y al personal y autoridades del mismo. En especial a la **Unidad de Suelos y Riegos**, por haberme aceptado y apoyado durante mi estancia como investigador visitante.

A la **SEMARNAT-México**, por haberme facilitado las imágenes de satélite Landsat.

Al **Instituto de Geología y Metalurgia**, UASLP, por permitirme usar el transferiscopio para la restitución de las fotografías aéreas.

Los trabajos referentes al área de Bujaraloz se llevaron a cabo en el marco de los proyectos CICYT-REN2003-00742 financiado por España, y C1P-2328 financiado por la Agencia Espacial Europea.

### Personas

En especial al **Dr. Juan Herrero Isern** por compartir desinteresadamente su experiencia, conocimientos y material personal que sin ellos no hubiera sido posible la conclusión del presente trabajo. Además por su inestimable paciencia, apoyo incondicional y confianza que tuvo hacia mi persona, mis dudas y tropiezos, que sin duda no le facilitaron la dirección de la tesis.

A la **Dra. Rosa Maria Poch i Claret** por la tutoría, interés, sugerencias y críticas del trabajo de tesis.

Al **Dr. Ramón Aragües**, por el apoyo y facilidades otorgadas en cada una de las actividades desarrolladas en la Unida de Suelos y Riegos bajo su dirección.

A la **Dra. Carmen Castañeda del Álamo** por los comentarios y sugerencias sobre teledetección, y sobre todo por la ayuda en la fase de campo en Bujaraloz, España.

A la **Dra. Judith Ramos Hernández** por su asesoría y comentarios en la transformación del nivel digital de la banda térmica a temperatura superficial.

A la **Dra. M<sup>a</sup> Auxiliadora Casterad Seral** por las sugerencias y correcciones del capítulo de teledetección.

Al maestro **Jaume Boixadera i Llobet**, por su asesoría en la clasificación taxonómica.

Al **personal docente del Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl, UdL**, por sus valiosos comentarios y sugerencias tendientes a mejorar la tesis.

Al **Dr. José Luis Flores Flores** por las sugerencias en varios apartados de la presente investigación.

A los **compañeros y amigos becarios del CITA**, de los cuales siempre tuve su apoyo y con los que compartí momentos agradables. También agradezco al personal administrativo que siempre estuvo dispuesto a ayudarme cuando necesité su ayuda, en especial a Miguel Ángel Franco, y a Rosa Gómez Báguena.

Gracias a todos.

## **Un enfoc multiescala en la cartografia i gènesi de sòls guixencs de San Luis Potosí, Mèxic**

### **RESUM**

La Zona Mitjana i l'Altiplà potosins, a Mèxic, es caracteritzen per la semblança en el tipus de sòls a les parts baixes, riques en guix. També la seva utilització és similar, degut a les similituts socioeconòmiques.

Aquest tesi s'organitza en cinc capítols, el primer és la introducció general, i el cinquè, les conclusions. En els altres quatre es tracten els sòls guixencs: la seva localització, extensió, característiques físico-químiques, mineralogia, micromorfologia, classificació taxonòmica i capacitat d'ús.

L'estudi ha generat informació sobre els sòls guixencs de l'Estat de San Luis Potosí i ha aportat dades que permeten respondre a vàries qüestions.

Al segon capítol s'ha donat resposta a Quina localització i extensió tenen els sòls guixencs a l'Estat de San Luis Potosí?. Al respecte, s'han generat dos mapes de zones amb guix, un per a la Zona Mitjana amb 203000 hectàrees de sòls guixencs i un altre per a l'Altiplà amb 193000 ha. Així s'han reconegut noves àrees guixenques i se n'han descartat d'altres.

Al tercer capítol s'investiga la utilitat de les imatges Landsat ETM+ en la discriminació de terrenys amb guix edàfic o geològic i es planteja si la banda d'infraroig tèrmic és útil per a discriminar-les. Amb aquesta finalitat s'han seguit treballs paral·lels amb imatges de San Luis Potosí i de terrenys guixencs del centre d'Aragó. Es responen així les qüestions Els sòls guixencs o litologies de guix tenen un comportament espectral típic que els distingeix d'altres? i la banda tèrmica té utilitat en la discriminació de materials guixencs? S'ha trobat que les imatges Landsat, incloent la banda tèrmica transformada a temperatura superficial són útils.

Al quart capítol es plantegen qüestions com Quines son les característiques micromorfològiques dels sòls guixencs? i Quina és la classificació taxonòmica d'aquests sòls?. Mitjançant làmines primes de sòls es respon a la primera qüestió, describint la micromorfologia dels sòls guixencs. Els principals minerals es reconeixen al microscopi en làmines primes i per difracció de raigs X. La classificació taxonòmica s'actualitza segons Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999) i la Base Referencial Mundial del Recurs Sòl (WRB, 1999).

Aquest treball ha produït informació relevant per a la recerca en sòls guixencs. Per exemple, les dades físiques, químiques, i micromorfològiques són part de la informació necessària per a l'evaluació de la qualitat de la terra, y per a determinar-ne el seu maneig racional.

## **A multiscale approach in the cartography and genesis of gypseous soils of San Luis Potosí, Mexico.**

### **ABSTRACT**

The Zona Media and the Altiplano potosino, Mexico, are similar areas because of the abundance of gypsum in their lower parts, an also because of their analogous socioeconomy.

This Thesis is organized in five Chapters, the first is a general introduction, and the fifth contains the conclusions. The other three Chapters investigate the location, extent, physic and chemical characteristics, mineralogy, taxonomic classification, and use potential of the gypsiferous soils in both areas.

The information generated about the gypseous soils of San Luis Potosí State, enabled to answer some questions. In the second chapter, with the cartography we can answer ¿What is the location and extent of the soils rich in gypsum of San Luis Potosí?. Two gypsiferous lands maps were generated. In the Zona Media this soil rich in gypsum occupies 203 000 ha and 193 000 ha in the Altiplano. These new maps allow to update the existing cartography by adding new areas and rejecting others.

The utility of Landsat ETM+ imagery and its thermic band in the discrimination of lands with gypsum or with gyprock were investigated in the third chapter. For this purpose, parallel protocols have been applied and evaluated to Landsat images of San Luis Potosí, Mexico, and the center of Aragon, Spain. The questions ¿The gypsiferous soils or lands with gyprock have different spectral behaviour of the others soils or rocks? and ¿The thermic band is useful for the discrimination of gypseous materials? were answered. According to the positive results in lands with gypseous soils of San Luis Potosí, Mexico, and in gypseous litology in Aragón, Spain, the Landsat imagery in general, and the thermic band transformed to superficial temperature, were useful in the discrimination of lands rich in gypsum.

The questions ¿What are the micromorphologic characteristics of gypsiferous soils?, ¿What is the mineralogy of soils rich in gypsum?, and ¿What is their taxonomic classification? were answered in the fourth chapter. These question were answered with thin sections analysis, and with microscopic and X-rays diffraction study of the main minerals. The classification of soils was updated after Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999) and after World Reference Base for Soil Resources (WRB, 1999).

The information generated by this study is important for the research in gypseous lands. As an example, the physical, chemical and micromorphological data are part of the information needed for land quality evaluation, and for the rational management of these lands.

## **RESUMEN GENERAL**

Se estudian los suelos de la Zona Media y el Altiplano potosino, México, desde el nivel macro (campo y teledetección) al micro (micromorfología). Estas áreas se asemejan en el tipo de suelo de las partes bajas, ricas en yeso, y también por condiciones socioeconómicas similares.

El trabajo se organiza en cinco capítulos el primero es la introducción general y el quinto son las conclusiones de la tesis. En los otros tres capítulos se estudian los suelos yesosos, comprendiendo aspectos de: localización, extensión, características fisicoquímicas, mineralogía, micromorfología y clasificación.

La información generada sobre los suelos yesosos permite responder a varias interrogantes sobre este recurso. Así, en el segundo capítulo, mediante la cartografía se respondió a ¿Cuál es la ubicación y extensión de los suelos yesosos del estado de San Luis Potosí? Al respecto se generaron dos mapas de las áreas yesosas, uno para cada región. En la Zona Media este tipo de suelo comprende 203 000 ha y 193 000 ha en el Altiplano. Reconociendo áreas no consideradas hasta el momento como yesosas y descartando otras que no lo son.

En el tercer capítulo se investiga la utilidad de las imágenes Landsat ETM+ en la discriminación de terrenos con yeso edáfico o geológico. También se indaga si la banda del infrarrojo térmico es útil para tal fin. Para ello se han desarrollado trabajos paralelos con imágenes de San Luis Potosí y de terrenos yesosos del centro de Aragón, España. Se responde así a las preguntas ¿Los suelos yesosos o litologías de yeso tienen un comportamiento espectral típico que permite distinguirlos de los demás suelos o litologías?, y ¿la banda térmica tiene utilidad en la discriminación de materiales yesosos?. Los resultados constatan que las imágenes Landsat, incluyendo la banda térmica transformada a temperatura superficial, sí son útiles en la discriminación de terrenos yesosos, ello dados los resultados positivos tanto en suelos yesosos en San Luis Potosí, México, como en litología yesosa en Aragón, España.

En el cuarto capítulo se abordan las preguntas ¿Cuáles son las características micromorfológicas de los suelos yesosos?, ¿Cuál es la mineralogía de suelos yesosos?, ¿Cuál es la clasificación de estos suelos?. Mediante el estudio de secciones delgadas de suelos se responde a la primera pregunta, describiendo la micromorfología de los suelos yesosos. Los principales minerales se reconocen al microscopio en secciones delgadas y por DR-X. La clasificación de suelos se actualiza según Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999) y la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB, 1999).

El presente trabajo generó información relevante para investigación en terrenos yesosos. Por ejemplo los datos físicos, químicos y micromorfológicos, son parte de la información necesaria para la evaluación de la calidad de la tierra, y para determinar el manejo racional de la misma.



ÍNDICE

	<b>Página</b>
<b>RESUMEN GENERAL.....</b>	i
Tablas.....	x
Figuras.....	xiii
Abreviaturas y siglas.....	xix
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL.....</b>	1
1. Introducción.....	1
2. Objetivo.....	5
3. Estructura de la tesis.....	5
4. Literatura citada.....	7
<b>CAPÍTULO II. CARTOGRAFÍA DE LAS ÁREAS YESOSAS DEL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO.....</b>	13
Resumen.....	13
1. Introducción.....	14
2. Revisión bibliográfica.....	16
3. Objetivo.....	19
4. Material y método.....	19
4.1. Características del área de estudio.....	19
4.1.1. Localización.....	19
4.1.2. Clima.....	19
4.1.3. Fisiografía.....	21
4.1.4. Suelos.....	23
4.1.5. Vegetación.....	25
4.2. Método.....	26
4.2.1. Etapa de precampo o gabinete.....	26
4.2.1.1. Delimitación del área yesosa reportada por CETENAL.....	26
4.2.1.2. Delimitación del área yesosa probable.....	27
4.2.2. Etapa de campo. Verificación cartográfica.....	29
4.2.3. Etapa de postcampo.....	33
4.2.3.1. Análisis químico de suelos.....	33
4.2.3.2. Interpretación del pH y de la CE.....	34
4.2.3.3. Restitución fotogramétrica y digitización.....	35

5. Resultados y discusión.....	36
5.1. Mapas generados.....	36
5.2. El pH <sub>1:5</sub> y la CE <sub>1:5</sub> .....	39
5.2.1. Interpretación de los valores de pH <sub>1:5</sub> y la CE <sub>1:5</sub> en los sitios de verificación cartográfica.....	41
5.2.1.1. pH <sub>1:5</sub> .....	41
5.2.1.2. Conductividad eléctrica.....	46
5.2.2. Relación entre el pH <sub>1:5</sub> y la CE <sub>1:5</sub> en los sitios de verificación cartográfica.....	51
5.2.3. Relación del pH <sub>1:2.5</sub> y la CE <sub>es</sub> con las sales solubles, carbonato de calcio y yeso.....	56
6. Conclusiones.....	61
7. Literatura citada.....	63
Anexo II. 1. Datos medios mensuales de varias estaciones meteorológicas. a) CNA, 2000; b) García, 1988.....	70
Anexo II.2. Mapas.....	71
<b>CAPÍTULO III. DISCRIMINACIÓN DE TERRENOS O LITOLOGÍA     DE YESO MEDIANTE IMÁGENES LANDSAT.....</b>	<b>77</b>
Resumen.....	77
1. Introducción.....	78
2. Revisión bibliográfica.....	81
2.1. Características espectrales del yeso en laboratorio.....	81
2.2. Utilidad general de las imágenes Landsat en la discriminación del yeso.....	83
2.3. Técnicas y tratamientos de imágenes para la discriminación de terrenos yesosos.....	86
2.3.1. Análisis visual de imágenes de satélite.....	86
2.3.2. Análisis de componentes principales.....	88
2.3.3. Albedo y color del suelo.....	89
2.3.4. Técnica del elemento puro o final, “endmember”.....	90
2.4. Conclusiones de la revisión bibliográfica.....	92
3. Objetivos.....	93
4. Material.....	93

4.1. Características de las áreas de estudio.....	93
4.1.1. Localización.....	93
4.1.2. Clima.....	93
4.1.3. Fisiografía y geología.....	96
4.2. Material utilizado.....	100
5 Método.....	101
5.1. Procesamiento previos de las imágenes.....	101
5.1.1. Georreferenciación y remuestreo.....	101
5.1.2. Corrección atmosférica y transformación de los ND a reflectancia, bandas 1-5, 7.....	104
5.1.3. Transformación del ND de la banda 6 a temperatura superficial	105
5.1.4. Recortes y máscara.....	106
5.2. Extracción de información temática.....	107
5.2.1. Extracción de información mediante análisis visual.....	107
5.2.1.1. Análisis visual de las bandas originales.....	108
5.2.1.2. Análisis visual en las transformaciones de la imagen.....	108
A. Albedo.....	108
B. Transformación IHS (Intensidad, Tono, Saturación).....	108
C. Transformación Tasseled cap, TC.....	108
D. Análisis de componentes principales.....	109
E. Índice de yeso.....	109
5.2.2. Extracción de información temática mediante clasificación supervisada de las imágenes Landsat ETM+.....	110
5.3. Evaluación de los mapas obtenidos.....	115
5.4. Suavizado.....	116
6. Resultados y discusión.....	117
6.1. La transformación del ND del IRt a temperatura superficial.....	118
6.2. Resultados con las imágenes de Cedral.....	123
6.2.1. Análisis visual.....	123
6.2.1.1. Por banda y albedo.....	123
6.2.1.2. Composición en falso color en las bandas originales.....	124
6.2.1.3. Composición en falso color con las transformaciones IHS y TC.....	124

6.2.1.4. Análisis de componentes principales, ACP.....	126
6.2.1.5. Índice de yeso.....	128
6.2.2. Clasificación supervisada de las imágenes Landsat.....	131
6.2.2.1. Área yesosa.....	131
6.2.2.2. Subescena completa.....	136
6.2.3. Utilidad de la banda térmica.....	140
6.3 Resultados con las imágenes de Bujaraloz.....	143
6.3.1 Análisis visual.....	143
6.3.1.1. Por banda y albedo.....	143
6.3.1.2. Composición falso color, CFC, con las bandas originales..	145
6.3.1.3. Composición falso color con las transformaciones IHS y TC.....	149
6.3.1.4. Análisis de componentes principales (ACP).....	151
6.3.1.5. Índice de yeso.....	155
6.3.2. Clasificación supervisada de las imágenes Landsat.....	157
6.3.2.1. Subescena completa.....	157
6.3.2.2. Clasificación supervisada en el área sin vegetación.....	163
6.3.3. Utilidad de la banda térmica.....	169
7. Conclusiones.....	177
8. Literatura citada.....	179
9. Anexo.....	186
<b>CAPÍTULO IV. MORFOLOGÍA Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS</b>	
<b>YESOSOS.....</b>	<b>191</b>
Resumen.....	191
1. Introducción.....	192
2. Revisión bibliográfica.....	193
2.1. Micromorfología.....	193
2.2. Morfología del yeso.....	194
2.3. Hábito del yeso.....	196
2.4. Principales minerales de suelos yesosos.....	200
2.5. Clasificación de suelos.....	201
2.5.1. Horizonte gypsico.....	203
2.5.2. Horizonte hipergypsico.....	204

2.5.3. Horizonte petrogypico.....	205
2.5.4. Clasificación de suelos yesosos en México.....	206
3. Objetivos.....	207
4. Método.....	207
4.1. Localización.....	207
4.2. Ubicación de las calicatas y descripción de perfiles de suelos.....	208
4.3. Muestreo de suelos.....	210
4.4. Análisis fisicoquímicos de suelos.....	210
4.5. Designación de horizontes diagnóstico y genéticos.....	211
4.5.1. Horizontes genéticos y subíndices.....	211
4.5.2. Denominación de horizontes diagnóstico.....	214
4.6. Micromorfología.....	215
4.7. Mineralogía.....	217
5. Resultados y discusión.....	218
5.1 Suelos de ladera.....	220
5.2. Suelos en microrrelieve ondulado.....	231
5.2.1. Suelos en posición somital.....	231
5.2.2. Suelos en valle ciego.....	247
5.2.3. Suelos en “joya”.....	285
5.3. Suelos en planicie.....	291
5.3.1. Suelos en planicie con horizonte yesoso somero.....	291
5.3.2. Suelos en planicie con horizonte yesoso somero, fase salina.....	331
5.3.3. Suelos en planicie con horizonte yesoso somero, fase salino- sódica.....	375
5.3.3. Suelos en planicie con horizonte yesoso profundo.....	389
5.4. Resumen de la descripción de las secciones delgadas de suelo.....	420
5.5. Clasificación.....	431
6. Conclusiones.....	439
7. Literatura citada.....	442
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES GENERALES.....</b>	<b>457</b>

## Índice de Tablas

## Tablas del capítulo II

No	Título	Página
II.1	Precipitación, evaporación (P y Ev) y tipo de clima (sistema climático de Köppen adaptado a México por García, 1973) para varias estaciones meteorológicas de SLP.....	24
II.2	Interpretación de los intervalos de pH en agua 1:2.5 y CE dS/m 25 °C	35
II.3	Superficie yesosa reportada por CETENAL y el área yesosa final encontrada en el presente estudio.....	37
II.4	Valores de pH y CE a 25 °C, en relación suelo:agua 1:5, medidos en los sitios de verificación cartográfica en el Altiplano Potosino.....	39
II.5	Valores de pH y CE a 25 °C, en relación suelo:agua 1:5, medidos en los sitios de verificación cartográfica en la Zona Media.....	40
II.6	pH determinado a varias relaciones suelo:agua.....	43
II.7	Conductividad eléctrica*, dS/m 25 °C, determinada en extracto de saturación y en otras diluciones suelo:agua.....	46
II.8	Regresiones lineales simples entre la conductividad eléctrica en extracto de saturación (CEes) y las conductividades en extractos suelo:agua a otras diluciones (1:1, 1:2.5, 1:5, y 1:10); desviaciones típicas del interceptor ( <i>a</i> ) y de la pendiente ( <i>b</i> ), y coeficiente de determinación ( $R^2$ ).....	47
II.9	Superficie con problemas de sales solubles y/o de sodio de acuerdo a los Mapas 1 y 2 del Anexo (CETENAL, 1971, 1972, 1973 y 1975)....	49
II.10	Especies vegetales según el intervalo de pH y CE.....	53

## Tablas del capítulo III

III.1	Unidades Litológicas de la zona endorreica de Bujaraloz-Sástago (Salvany <i>et al.</i> , 1996) y nombres simplificados utilizados.....	98
III.2	Materiales utilizados en las dos áreas de estudio.....	100
III.3	Características de las imágenes utilizadas.....	103

III.4	Clases temáticas establecidas en Cedral (incluyendo las presentes solamente en la subescena completa, C) y su correspondencia con la vegetación y los suelos según los mapas de CETENAL (1972) e INEGI (1983) en el área agrícola y vegetación natural en ellos delimitadas.....	112
III.5	Clases de partida (las primeras 12 de la primera columna son las Unidades Litológicas de Salvany <i>et al.</i> , 1996) y clases temáticas finales y agrupadas, Bujaraloz.....	113
III.6	Utilidad cualitativa de las bandas, sus transformaciones y procesos de análisis visual en la discriminación de áreas yesosas por zona de estudio.....	117
III.7	Resultados de la aplicación de las dos formas (I y II) de transformación del ND del IRt a temperatura superficial, °C.....	118
III.8	Valores máximos y mínimos del NDVI utilizados en la transformación de la banda térmica a temperatura superficial.....	120
III.9	Temperatura (°C) a las 10:00, hora GMT, y fecha de las imágenes para la estación meteorológica de Montañana en parcela lisimétrica de hierba, y temperatura obtenidas con la banda térmica ETM+F1 con la Forma II.....	122
III.10	Resumen de la matriz de confusión de las imágenes de Cedral.....	134
III.11	Superficie (ha, %) por clase temática, Cedral.....	137
III.12	Cambios en la separabilidad al no considerar la banda térmica en la clasificación, Cedral.....	142
III.13	Resumen de la matriz de confusión de la clasificación supervisada con 14, 12 y 8 clases, incluyendo las clases regadío y áreas húmedas, Bujaraloz.....	158
III.14	Resumen de la matriz de confusión de la clasificación supervisada con 14 clases, por imagen de junio y agosto y juntas, Bujaraloz.....	160
III.15	Resumen de la matriz de confusión de la clasificación supervisada en la máscara de la imagen de agosto, Bujaraloz.....	165
III.16	Superficie, ha, por clase temática y clasificación supervisada de la imagen multitemporal (con 21 bandas) y en la máscara, Bujaraloz.....	168

III.17	Resumen de la matriz de confusión de la clasificación supervisada multitemporal con y sin banda térmica, Bujaraloz.....	173
--------	---	-----

**Tablas del capítulo IV.**

IV.1.	Láminas delgadas descritas y profundidad de muestreo. Se indica la forma en que serán nombrados en lo sucesivo.....	216
IV.2	Resultados de los análisis físicos, químicos y mineralógicos del Pedión P4.....	221
IV.3	Resultados de los análisis fisicoquímicos y mineralógicos, Pedión P9.	233
IV.4	Resultados de los análisis físicos, químicos y mineralógicos, Pedión P12.....	239
IV.5	Resultados de los análisis físicos, químicos, Pedión P10.....	249
IV.6	Resultados de los análisis físicos, químicos y mineralógicos, Pedión P13.....	262
IV.7	Resultados de los análisis físicos, químicos y mineralógicos, Pedión P15.....	288
IV.8	Resultados de los análisis físicos y químicos, Pedión P7.....	293
IV.9	Resultados de los análisis físicos, químicos y mineralógicos, Pedión P11.....	304
IV.10	Resultados del análisis físicos, químicos y mineralógico, Pedión P14	314
IV.11	Resultados de los análisis físicos y químicos, Pedión P16.....	327
IV.12	Resultados de los análisis físicos, químicos y mineralógicos, Pedión P1.....	335
IV.13	Resultados de los análisis físicos y químicos, Pedión P6.....	347
IV.14	Resultados de los análisis físicos, químicos y mineralógicos, Pedión P8.....	355
IV.15	Resultados de los análisis físicos y químicos, Pedión P3.....	376
IV.16	Resultados de los análisis físicos, químicos y mineralógicos, Pedión P2.....	390
IV.17	Resultados de los análisis físicos, químicos y mineralógicos, Pedión P5.....	403

IV.18	Secuencia de carbonatación de suelos (Gile <i>et al.</i> , 1966) y de gipsificación (A) de Van Hoesen (2000) y Buck y Van Hoesen (2002). Adaptaciones, de manera tentativa, de Eswaran y Zi-Tong (B, 1991); estadios de evolución de materiales yesosos de Stoops y Poch (C, 1994); y en chesas de Herrero (D, 1991). Grado de acumulación de yeso en el pedión P5 incorporando el concepto de fábrica en islas de Herrero <i>et al.</i> (1992).....	419
IV.19	Resumen de la micromorfología de los suelos estudiados.....	420
IV.20	Clasificación de los perfiles estudiados, ordenados por su posición en el paisaje y presentación del suelo.....	432

## Índice de Figuras

<b>Figuras del capítulo II</b>		
<b>No</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
II.1	Localización de los municipios y ubicación aproximada de las áreas en las que se realizó el estudio, Altiplano y Zona Media, San Luis Potosí, México.....	20
II.2	Diagramas ombrotérmicos de algunas estaciones meteorológicas del Altiplano (Vanegas, San Juan del Salado, Matehuala y Palo Blanco) y de la Zona Media (Las Tablas, Villa Juárez, Cerritos y Rioverde), San Luis Potosí. Datos mensuales. Temperatura (T, °C), Precipitación (P, mm) y Evaporación (Ev, mm).....	22
II.3	Provincias fisiográficas del estado de San Luis Potosí (INEGI, 1983), delineación propia a mano alzada sobre la representación tridimensional del estado (PDUSLP, 2000).....	23
II.4	Esquema del método de trabajo.....	26
II.5	Rasgos del paisaje que indican la presencia de suelo yesoso.....	30
II.6	Proceso de obtención del mapa de áreas yesosas final con base a mapas de CETENAL, fotografías aéreas, espaciomapas y trabajo de campo y laboratorio.....	32
II.7	Prueba cualitativa de la presencia de yeso, el precipitado blanco lechoso indica reacción positiva.....	333
II.8	Distribución de los suelos yesosos (Xy, Yy, incluyendo los que presentan fase petrogípsica o petrogípsica profunda) reportados por CETENAL (1971, 1972, 1973 y 1975) a escala 1:50 000.....	36
II.9	Distribución de frecuencias del pH del horizonte yesoso en los sitios de verificación cartográfica.....	42
II.10	Precipitación y evaporación acumuladas en los años de 1999 y 2000, para varias estaciones meteorológicas de la Zona Media (CNA, 2001)	45
II.11	Conductividad eléctrica en extracto de saturación y las conductividades en extractos suelo:agua a otras diluciones.....	47
II.12	Distribución de frecuencias de la CE, dS/m 25 °C, del horizonte yesoso en los sitios de verificación cartográfica.....	48

II.13	Gráfica de caja (boxplot) de la CE y del pH en los sitios de verificación por región y por horizonte, datos de las Tablas II.4 y II.5. La caja interior indica el intervalo de confianza de la mediana al 95 %.....	50
II.14	Relación entre el pH y la conductividad eléctrica en los sitios de verificación cartográfica.....	51
II.15	Relación entre el pH en agua 1:2.5 con las sales solubles en extracto de saturación, con el CaCO <sub>3</sub> , con el yeso y con la razón yeso/CaCO <sub>3</sub> en las 72 muestras de suelo de la segunda y tercer campaña.....	56
II.16	Relación entre la CE con las sales solubles en extracto de saturación, con el CaCO <sub>3</sub> y con el yeso en las 72 muestras de suelo tomadas en la segunda y tercera campaña.....	59
<b>Figuras del capítulo III</b>		
III.1	Firma espectral del yeso en el intervalo visible e infrarrojo obtenida en laboratorio en la que se indica las bandas de absorción (Hunt, 1977).....	82
III.2	Localización de las áreas de estudio, Cedral (a) y Bujaraloz (b). Para Cedral se indican las áreas yesosas (yeso somero < 50 cm y profundo > 50 cm) a las que se hace referencia en lo sucesivo.....	94
III.3	Diagramas ombrotérmicos de las estaciones meteorológicas de Cedral y Vanegas, México y del observatorio meteorológico de Bujaraloz, Zaragoza, España (temperatura multiplicada por dos).....	95
III.4	Perfiles topográficos o altitudinales del área de estudio en Cedral y en Bujaraloz.....	93
III.5	Mapa litológico de la zona endorreica Bujaraloz-Sástago (Salvany <i>et al.</i> , 1996) modificado posteriormente por Salvany (comunicación personal, 2002) digitizado en el SIA-DGA ahora CITA. Entre paréntesis están los nombres simplificados utilizados en lo sucesivo...	98
III.6	Esquema de los procesos de preparación de las imágenes de trabajo y de la extracción de información.....	102
III.7	Resultados de la aplicación de las dos formas I y II para la transformación del nivel digital, ND, del IRt a temperatura.....	121
III.8	Banda térmica por imagen, Cedral.....	123

III.9	Algunas composiciones en falso color de mayor utilidad en la toma de las áreas de entrenamiento, área yesosa I-28/43, Cedral.....	125
III.10	Algunas composiciones en falso color de mayor utilidad en la toma de las áreas de entrenamiento, subescena completa I-28/43, Cedral.....	126
III.11	Dispersogramas del ACP con 7 bandas que muestran los píxeles de mayor pureza (“ <i>endmembers</i> ”) respecto a una cobertura o condición del terreno, imágenes de Cedral.....	127
III.12	Índice de yeso, imagen de la época seca (28/44) y húmeda (28/43), Cedral.....	129
III.13	Relación entre el índice de yeso y la reflectancia para las áreas agrícolas sin cultivo, Cedral.....	130
III.14	Distribución de frecuencias de temperatura por imagen y ubicación general de las clases temáticas para el área yesosa, Cedral.....	131
III.15	Firma espectral de las clases temáticas mencionadas en la Tabla III.4. Imagen de la época húmeda (I-28/43) y seca (I-28/44), Cedral.....	133
III.16	Distribución de las clases temáticas de ocupación del suelo en el área yesosa, suavizada con un filtro 3×3 y estadístico moda, Cedral.....	138
III.17	Distribución de las clases temáticas de ocupación del suelo en la subescena, suavizada con un filtro 3×3 y estadístico moda, Cedral.....	139
III.18	Temperatura superficial de las clases temáticas mencionadas en la Tabla III.5, imagen de la época húmeda (I28/43) y seca (I28/44), Cedral.....	141
III.19	Banda ETM+1 de la imagen de agosto (a) e imagen RGB multitemporal de la misma banda (b, R=marzo, G=junio y B=agosto), con los límites del mapa litológico de Salvany <i>et al.</i> (1996) superpuesto, Bujaraloz.....	144
III.20	Cantera de yeso en la Unidad Litológica yeso, caliza y lutita o clase temática yeso, Bujaraloz.....	146
III.21	Combinaciones RGB741 (por imagen y multitemporal) de utilidad en el análisis visual, Bujaraloz.....	147
III.22	Combinaciones RGB147 (por imagen y multitemporal) de utilidad en el análisis visual, Bujaraloz.....	148

III.23	Transformación IHS (a) y Tasseled Cap (b) de la imagen de agosto, Bujaraloz.....	150
III.24	Composición RGB (a) de las componentes principales obtenidas con las siete bandas de la imagen de agosto, y divididas en dos grupos (Visible, VI, ETM123 e IR ETM5, 7) utilizando (b) la CP1 de cada grupo y (c) la CP2 complementados con la banda ETM4, Bujaraloz...	152
III.25	Dispersogramas del ACP con (i) y sin (ii) la banda térmica mostrando los píxeles de mayor pureza (“ <i>endmembers</i> ”) de alguna cobertura o condición del terreno, Bujaraloz.....	154
III.26	Índice de yeso superficial, imagen de agosto, Bujaraloz.....	155
III.27	Relación entre el índice de yeso y la reflectancia para algunas bandas, imagen de marzo, Bujaraloz.....	157
III.28	Salada Valdefrancín antes y después de ser labrada, tapiz algal y acercamiento a 25 mm de distancia con MEB a 8 mm de distancia, y gráfica de la composición característica del yeso (espectrómetro de dispersión de energía de los rayos X, EDS), Bujaraloz.....	164
III.29	Firmas espectrales de las clases temáticas generadas, Bujaraloz.....	166
III.30	Valores de la temperatura por clase temática e imágenes completas, Bujaraloz.....	170
III.31	Valores de temperatura superficial por clase temática obtenida en la máscara de la imagen de agosto, Bujaraloz.....	171
III.32	Clasificación supervisada de la imagen multitemporal con 14 y 12 clases. Suavizadas con filtro 3x3 y estadístico moda, Bujaraloz.....	174
III.33	Clasificación supervisada de la imagen multitemporal sin las bandas térmicas con 8 y 14 clases. Suavizadas con filtro 3x3 y estadístico moda, Bujaraloz.....	175
III.34	Clasificación supervisada de la máscara de la imagen de agosto con 8 y 6 clases. Suavizadas con filtro 3x3 y estadístico moda, Bujaraloz.....	176

**Figuras del capítulo IV**

IV.1	Esquema del método de trabajo.....	208
IV.2	Localización de las en el Altiplano y Zona Media, San Luis Potosí....	209
IV.3	Muestreo de suelos para el análisis micromorfológico.....	210
IV.4	Ubicación de las calicatas de acuerdo a la altitud y distancia entre ellos, y transecto idealizado según posición e el paisaje.....	219

## Abreviaturas y siglas

<b>Abreviatura</b>	<b>Significado</b>
$\varepsilon$	Emisividad
K	Índice kappa general
$\kappa$	Índice kappa por clase
(A)	Clima semicálido
(e)	Clima extremo, con oscilación anual de la temperatura media mensual entre 7 y 14 °C
(h')	Clima cálido, temperatura media anual mayor a 22 °C, y del mes más frío menor a 18 °C
(w)	Indica los porcentajes de precipitación invernal, con respecto al total anual
ACP	Análisis de Componentes Principales
Al	Aluvial
Ar	Arenisca
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer
AVIRIS	Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer
BS	Clima seco desértico o semidesértico
BS <sub>0</sub>	El clima más seco de los BS, P/T < 22.9
BS <sub>1</sub>	El menos seco de los climas secos desérticos o semiáridos, cociente Precipitación/Temperatura, P/T > 22.9
BW	Clima árido o desértico
Ca	Clima templado con verano cálido, temperatura media anual entre 12 y 18 °C, del mes más frío entre -1 y 18 °C y del mes más caliente mayor a 22 °C
CE	Conductividad eléctrica
CETENAL	Comisión de Estudio del Territorio Nacional, México
CFC	Composición en Falso Color
CITA	Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón
Ck	Castañozem cálcico
CNA	Comisión Nacional del Agua, México
CP	Colegio de Postgraduados, México
CP	Componente Principal

## Índice

CRM	Consejo de Recursos Minerales, México
Cz	Caliza
DNVI	Diferencia normalizada del índice de vegetación (Normalized Difference Vegetation Index)
DR-X	Difracción de rayos X
DT	Divergencia Transformada
EC	Exactitud cartográfica
EI	Exactitud de identificación
EP	Exactitud del productor
ETM+	Enhanced Thematic Mapper plus, sensor del satélite Landsat 7
EU	Exactitud del usuario
Ev	Evaporación
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
FG	Fiabilidad global
fs	Suelo fuertemente salino por lo menos en una parte del perfil a menos de 125 cm de profundidad, $CE_{es}$ mayor a 16 dS/m a 25 °C
Fv	Factor o fracción vegetación
g	Marcha anual de la temperatura tipo Ganges, es decir el mes más caliente se presenta antes del solsticio de verano (21 de junio)
h	Clima semicálido, temperatura media anual entre 18 y 22 °C, y del mes más frío menor a 18 °C
ha	Hectárea
hm	Horizonte mineral
ho	Horizonte orgánico
IB	Índice de Brillo
Ie	Litosol éutrico
IGME	Instituto Geológico Minero de España
IHS	Intensity, Hue, Saturation (Intensidad, Tono y Saturación)
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México
IRc	Infrarrojo cercano
IRm	Infrarrojo medio
IRt	Infrarrojo térmico

## Índice

IY	Índice de yeso
Iz	Izotal
JM	Distancia de Jeffries Matusita
k	Clima templado con verano cálido, temperatura media anual de 12 – 18 °C, del mes más frío -3 – 18 °C y del mes más caliente > 18 °C
LAT	Local apparent time (tiempo local aparente)
Lr	Lutita roja
ls	Suelo ligeramente salino por lo menos en una parte del perfil a menos de 125 cm de profundidad, $CE_{es}$ 4-8 dS/m a 25 °C
Lv	Lutita verde
MD	Matorral Desértico
Me	Matorral espinoso
Mg	Margocaliza
Mi	Matorral inerme
Ms	Matorral subinerme
Ms	Suelo moderadamente salino por lo menos en una parte del perfil a menos de 125 cm de profundidad, $CE_{es}$ 8-16 dS/m a 25 °C
Mz	Mezquital
n	Fase sódica, perfil con más de 15 % de saturación de sodio en alguna porción a menos de 125 cm de profundidad
ND	Nivel Digital
P	Precipitación
Pn	Pastizal natural
RAN	Registro Agrario Nacional, México
RGB	Red, Green y Blue (Rojo, Verde y Azul)
RGB	Red, Green, Blue
SAVI	Índice de vegetación ajustado al suelo
SEMARNAP	Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. Actualmente SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México
SLP	San Luis Potosí, México
SMN	Servicio Meteorológico Nacional, México
T	Temperatura

## Índice

TC	Transformación Tasseled Cap
TM	Thematic Mapper, sensor de los satélites Landsat 4 y 5
TM	Thematic Mapper, sensor del satélite Landsat 4 y 5
VI	Bandas del Visible
VIR	Bandas del visible e infrarrojo cercano y medio
Vp	Vertisol pélico
w	Clima con régimen de lluvias de verano, lluvia invernal entre 5 y 10.2 %
w <sub>0</sub> (w)	Es el clima más seco de los subhúmedos
x'	Clima con régimen de lluvias intermedio al del verano e invierno
Xh	Xerosol háplico
Xk	Xerosol cálcico
Xy	Xerosol gípsico
Y	Yeso
YD	Yeso-depresión
Yh	Yermosol háplico
Yy	Yermosol gípsico
Zg	Solonchak gléyco
Zo	Solonchak órtico

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCION GENERAL

**1. INTRODUCCIÓN.** Las regiones del estado de San Luis Potosí, México, conocidas como Zona Media y Altiplano presentan condiciones sociales, económicas y de manejo de recursos naturales similares. En ambas regiones el índice de marginación va de alto a muy alto, y solamente en las áreas cercanas a las capitales municipales es medio o bajo (CONAPO, 2002). Esta marginación, se traduce en alta mortalidad infantil (28.9 %), en analfabetismo superior al 14 %, en población sin agua entubada (>12 %), y en bajo salario. Más del 50 % de la población económicamente activa gana menos de dos salarios mínimos (CONAPO, 2002), equivalente a unos 5.5 €día ó 7.2 USD.

La emigración tanto al interior del país como fuera provoca descenso de la población en las áreas rurales (Charcas *et al.*, 2000; Gobierno de SLP, 2004), yéndose principalmente la clase trabajadora. Más del 64 % de los que migran al exterior, en específico a Estados Unidos de Norteamérica, tienen de 15 a 34 años de edad (CONAPO, 2002). En la Zona Media la actividad agrícola se inició desde la época prehispánica complementándose con caza y recolección, posteriormente evolucionó a la situación actual considerada como agrícola y ganadera (Charcas *et al.*, 2000). Tanto en el Altiplano como en la Zona Media, predomina la ganadería extensiva causando a menudo la degradación del agostadero y del ecosistema en sí al no considerar su carga animal.

En la actividad agrícola sobresale la de temporal (secano, cultivando básicamente maíz y frijol), frecuentemente con cosechas escasas o nulas debido a las condiciones meteorológicas. La escasa agua disponible para riego se maneja en forma inapropiada (Charcas *et al.*, 2000) con eficiencia global que ronda el 45 % (Ortiz y Amado, 2003) o cuando mucho el 60 % (Villanueva *et al.*, 2001), extrayendo agua en mayor cantidad a la recarga con el consecuente abatimiento del acuífero. Además, existen cerca de 20,000 ha (30 % de la superficie irrigada) con problemas de salinidad disminuyendo el rendimiento especies sensible (maíz, frijol, chile, jitomate), e incluso de la alfalfa, considerada semitolerante (Villanueva y Hernández, 2001).

Las áreas con alta marginación tanto del Altiplano como de la Zona Media, en gran parte coinciden con terrenos con alto contenido de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) denominados como

suelos yesosos (Herrero y Porta, 2000). La productividad de este tipo de suelo es de baja a moderada debido a su escaso contenido de fósforo, magnesio, nitrógeno, hierro, bajo contenido de materia orgánica, baja capacidad de intercambio catiónico, desbalance nutrimental originado por el alto contenido de calcio, compactación y baja capacidad de retención de agua aprovechable (Campbell y Foltz, 1938; Hernando *et al.*, 1963; de los Ríos, 1967; Alphen y de los Ríos, 1971; Daunicht *et al.*, 1976; Lagunes, 1985; Terrazas, 1985; FAO, 1990; Boyadgiev y Verheye, 1996; Herrero y Boixadera, 2002). El riego inadecuado provoca disolución del yeso, con subsidencias y deterioro de la infraestructura hidráulica, implicando ineficiencia en el riego (Alphen y de los Ríos, 1971; Boyadgiev y Verheye, 1996).

Es importante el estudio de los recursos naturales para establecer su uso sustentable, considerando aspectos de recuperación y mejoramiento de recursos. Ello contribuirá a conservar los recursos naturales, y a mejorar la calidad de vida de la población frenando el abandono del campo. En la medida en que se conozca un recurso se podrá establecer su uso racional. Así, es necesario conocer la localización de los suelos yesosos, la superficie que ocupan, sus características fisicoquímicas, su mineralogía, su micromorfología, su clasificación taxonómica, y su capacidad de uso. Sin embargo el conocimiento sobre los terrenos ricos en yeso es escaso, no sólo en el estado de San Luis Potosí sino en todo el país.

Los suelos ricos en yeso se han reportado tanto en el Desierto Chihuahuense (Grande *et al.*, 1967, 1987; García, 1968; Gómez, 1973; INEGI, 1981; Meyer y García-Moya, 1989; Meyer *et al.*, 1992; Herrero y Boixadera, 2002) como en el Sonorense (Vonder Haar y Gorsline, 1975; Ortlieb y Pierre, 1981). Su superficie es desconocida y solamente se mencionan datos aislados, por ejemplo, Jafarzadeh y Zinck (2000) indican que en México existen 1 100 000 ha de suelos yesosos. Incluso otros autores (Mashali, 1996) para México reportan suelos yesosos cuando en la fuente original (FAO, 1990) la asignan a Nuevo México, USA.

Para el estado de San Luis Potosí y con datos de la cartografía edafológica de CETENAL (1971, 1972, 1973 y 1975) a escala 1:50 000, la superficie aproximada es de 97 000 ha en el Altiplano y 96 000 ha en la Zona Media. Un simple reconocimiento de campo con apoyo de imágenes aéreas y satelitales, indica una superficie yesosa mayor y áreas

cartografiadas como yesosas sin serlo. Además los criterios en su día aplicados por CETENAL han quedado superados por los avances en los últimos 35 años tanto en teledetección como en edafología. Con fines de manejo es indispensable actualizar la cartografía de las áreas yesosas del estado de San Luis Potosí para conocer su ubicación y su extensión.

Además de la cartografía de CETENAL (hoy INEGI) específicamente sobre suelos, también existen los estudios del Consejo de Recursos Minerales a diversas escalas (1992, 1996ab, 1998, 1999abcd, 2000) en los que cartografía afloramientos de yeso. Asimismo algunos estudios geológicos aislados mencionan áreas yesosas (Martín del Campo, 1959; Hermoso, 1964; Urías, 1965; García, 1968 y 1978; López, 1973), o estudios del hábitat de fauna silvestre (Mellink, 1989; Ceballos *et al.*, 1993; Yeaton y Flores, 2004). Sin embargo en estos estudios geológicos, excepto Martín del Campo (1959), Hermoso (1964) y García (1968, 1978), únicamente mencionan la litología yesosa con posibilidad de explotación minera, y relegan al suelo a material sedimentario o lacustre sin señalar su distribución y ubicación. Pese a su antigüedad y limitaciones, los mapas que mejor reflejan los suelos yesosos son los de CETENAL.

A pesar de que la teledetección es útil en la cartografía temática, su uso en el estudio de suelos yesosos ha sido menor en comparación a su empleo en el mapeo de otros recursos naturales. Se han utilizado poco los datos de sensores remotos, con resultados irregulares, y no se ha explorado su potencialidad. Las más de las veces (Abd El-Hady, 1992; Younis, 1993; Mulders y Girard, 1993) se utiliza un cierto sensor (Landsat TM o ETM+) o una región del espectro electromagnético pero no dirigido específicamente a los suelos yesosos. Además se encuentran opiniones opuestas sobre la utilidad de determinadas bandas o tratamientos. Por ejemplo la banda térmica, para Bryant (1996) y Martínez-Ríos y Monger (2002) no es muy útil en el mapeo de suelos, y para otros (Crowley, 1993; Goossens y Van Ranst, 1998; Goossens *et al.*, 1999; Panah y Goossens, 2000) es de utilidad porque complementa la información de las bandas del visible e infrarrojo. De lo anterior se desprende la necesidad de investigar si las imágenes de satélite son de utilidad en la cartografía de terrenos yesosos.

La información existente en México sobre las características físicas y químicas de los suelos yesosos es limitada y varios de los estudios se relacionan con rasgos ecológicos

(Johnston, 1941; Gómez, 1973; Mellink, 1989; Mellink y Madrigal, 1993; Meyer y García-Moya, 1989; Meyer *et al.*, 1992; Ceballos *et al.*, 1993). Sobre la composición de estos suelos destacan los añejos trabajos de Grande *et al* (1967) y Grande (1987). Los suelos yesosos son el hábitat de plantas adaptadas a ellos (Johnston, 1941; Meyer, 1980, 1986; Meyer y García-Moya, 1989) denominadas gipsófilas. Estas áreas, también son el hábitat de algunas especies de animales, por ejemplo del perrito de las praderas, *Cynomys mexicanus* (Mellink, 1989; Ceballos *et al.*, 1993). Del mismo modo, el alto contenido en yeso exige manejo diferenciado.

Como se ha indicado, la clasificación de estos suelos hecha por CETENAL y publicada entre 1971 y 1975 ha quedado obsoleta debido al avance de la taxonomía (WRB, 1999; Soil Survey Staff, 1999). Además la micromorfología de los suelos yesosos es prácticamente desconocida en México, y en cuanto a la mineralogía existe el trabajo de Soria (2004). Tanto la micromorfología como la mineralogía en algunos casos son indispensables para la correcta clasificación taxonómica de un suelo, así como para conocer la fertilidad, la porosidad, la estructura, etc. Sin dicha información la clasificación taxonómica es dudosa (Gutiérrez, 1997).

Una finalidad de los estudios de los recursos naturales, entre ellos el suelo, es aportar información para la planeación de usos adecuados a la potencialidad del recurso. Dentro de los estudios con esta finalidad y específicos para suelos yesosos, puede considerarse precursor a de los Ríos (1967); su informe acerca de los terrenos yesosos del valle del Ebro, España se apoya en criterios agronómicos: valor de la tierra, cultivos, fertilidad química y física, problemas en ingeniería, vegetación natural, profundidad del suelo, contenido de yeso y su posición en el paisaje. Más adelante se ha tratado de sistematizar estos estudios para suelos ricos en yeso (FAO, 1990; Verheye y Boyadgiev, 1997) y también se ha planteado el adaptar a suelos yesosos alguno de los sistemas de evaluación existentes (Laya *et al.*, 1998). Estos aspectos, no abordados en la presente tesis, requerirán investigaciones específicas sobre el suelo, cultivos, etc. en laboratorio, en invernadero y en campo.

En todo caso, resalta la necesidad de conocer la ubicación y superficie de los suelos yesosos del estado de San Luis Potosí, así como su constitución y génesis para abrir el camino a trabajos más detallados que puedan desembocar en aplicaciones de interés

agrícola y ambiental. En esta línea, y con los medios disponibles para la presente investigación, se ha adoptado un enfoque multiescala. Partiendo de la experiencia directa y la observación en campo, se investigan los aspectos de constitución y micromorfología de estos suelos. A continuación se toman otros puntos de vista utilizando no sólo la fotografía aérea, al modo clásico en las cartografías de suelos, para establecer modelos de distribución de los suelos en el paisaje; se continúa el cambio de escala con datos de satélite Landsat aplicados específicamente a los suelos yesosos de San Luis Potosí, y en paralelo se comparan los resultados en suelos yesosos de la cuenca del Ebro (España).

**2. OBJETIVO.** El objetivo central de la tesis fue emprender el estudio general de las principales áreas yesosas del estado de San Luis Potosí, para ello la escala inicial empleada fue el trabajo clásico de campo, y se expande a niveles macro y micro.

El trabajo incluye aspectos de cartografía, de caracterización por teledetección tanto en San Luis Potosí como de otras regiones yesosas, de micromorfología, de mineralogía, de clasificación, y de caracterización física y química. Estos aspectos se espera sean la base para posteriores proyectos de investigación que permitan plantear el manejo sustentable de este tipo de suelo y de los recursos naturales asociados a él (por ejemplo, vegetación y fauna).

**3. ESTRUCTURA DE LA TESIS.** Para la consecución del objetivo indicado, la tesis se estructura en cinco capítulos, incluyendo el presente (I) y el de las conclusiones generales (V). El segundo capítulo aborda la localización, delimitación y obtención de la superficie de los suelos con alto contenido de yeso presentes en la Zona Media y en el Altiplano Potosino. Estos resultados, principalmente en forma de mapas, fueron la base para los demás capítulos.

En el tercer capítulo, muy relacionado con aspectos de cartografía, se indaga la utilidad de las imágenes de satélite Landsat ETM+ en la delimitación de terrenos yesosos o de litologías de yeso. Esta fase se realizó en parte del área yesosa del Altiplano Potosino, y con fines de comparar y verificar los resultados obtenidos, el estudio también se efectuó en un área suelo yesoso y con litología de yeso del Valle del Ebro, España. Con ello se resalta el interés de la teledetección satelital, si se usa una técnica válida, para identificar

terrenos yesosos o litologías de yeso, pudiéndose delimitar y conocer la superficie que ocupan las áreas yesosas en la región de interés.

El cuarto capítulo estudió la micromorfología y mineralogía de los suelos yesosos del estado de San Luis Potosí. Asimismo se ve la clasificación de acuerdo a los criterios actuales (WRB, 1999; Soil Survey Staff, 1999), actualizando así la taxonomía de los suelos yesosos del estado de San Luis Potosí, cuya información disponible data de 1968.

#### 4. LITERATURA CITADA.

- Abd El-Hady, A. M. 1992. Discrimination of gypsiferous, calcareous and sandy soil surfaces using the principal componentes (PC) transformation of Thematic Mapper. *Egyptian Journal of Soil Science* 32(1): 71-80.
- Allen, B. L. 1985. Micromorphology of aridosols. P: 197 – 216. In: Douglas, L. A., y Thompson, M. L. (Editors). Soil micromorphology and soil classification. SSSA *Special Publication No 15*. Madison, WI53711.
- Boyadgiev, T. G., y Verheye, W. H. 1996. Contribution to utilitarian classification of gypsiferous soil. *Geoderma* 74: 321 – 338.
- Bryant, R. G. 1996. Validated linear mixture modelling of Landsat TM data for mapping evaporite minerals on a playa surface: methods and applications. *International Journal of Remote Sensing* 17(2): 315 – 330.
- Campbell, R. S., y Foltz, I. C. 1938. Vegetation on gypsum soils of the jornada plain, New Mexico. *Ecology*, 19(4):572-577.
- Charcas-Salazar, H., Aguirre-Rivera, J. R., y Olivares-Sáenz, E. 2000. Proceso de conformación agrícola de la región de Río Verde, San Luis Potosí, México. *Revista Geográfica* 128: 105 – 1117.
- CETENAL, 1971. Cartografía temática escala 1:50 000, cartas: F14-A13, F14-A15, F14-A23, F14-A25, F14-A33 y F14-A35. SPP, México, D. F.
- CETENAL, 1972. Cartografía temática escala 1:50 000, cartas: F14-A14, F14-A24, F14-A34, F14-A45, F14-A55, F14-A57, F14-A67, F14-A76, F14-A77, F14-A86 y F14-A87. SPP, México, D. F.
- CETENAL, 1973. Cartografía temática escala 1:50 000, cartas: F14-A66, F14-C16 y F14-C17. SPP, México, D. F.
- CETENAL, 1975. Cartografía temática escala 1:50 000, cartas: G14-C74, G14-C75 y G14-C84. SPP, México, D. F.
- Ceballos, G., Mellink, E., y Hanebury, L. R. 1993. Distribution and conservation status of prairie dogs *Cynomys mexicanus* and *Cynomys ludovicianus* in Mexico. *Biological Conservation*, 63: 105 – 112.
- CONAPO, 2002. Colección Índices Sociodemográficos. *Índices de Intensidad Migratoria, 2000 México-Estados Unidos*.
- CRM, Consejo de Recursos Minerales, 1992. Monografía geológico – minera del estado de San Luis Potosí. Publicación M-7e. Serie: Monografías Geológico Mineras.

- Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Subsecretaría de Minas e Industria Básica. Gobierno del estado. 218 pp.
- \_ 1996a. Carta geológico – minera, Matehuala F14-1, escala 1:250 000. San Luis Potosí, Nuevo León, Zacatecas y Tamaulipas. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México.
- \_ 1996b. Carta geológico minera. Escala 1:50 000, San Vicente G14-C84, SLP. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, México, D. F.
- \_ 1998. Carta geológico – minera San Luis Potosí F14-4, escala 1:250 000. SLP, Zacatecas y Aguascalientes. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México.
- \_ 1999a. Carta geológico – minera Ciudad Mante F14-5, escala 1:250 000. SLP, Tamaulipas y Veracruz. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México.
- \_ 1999b. Carta geológico – minera Guanajuato F14-7, escala 1:250 000. Guanajuato y SLP. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México.
- \_ 1999c. Carta geológico – minera Ciudad Valles F14-8, escala 1:250 000. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México.
- \_ 1999d. Carta geológico minera. Escala 1:50 000, Real de Catorce, F14-A24, SLP. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, México, D. F.
- \_ 2000. Carta geológico minera. Escala 1:50 000, Pozas de Santa Ana (F14-A55) y Guadalcázar (F14-A65). Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, México, D. F.
- Crowley, J. K. 1993. Mapping playa evaporite minerals with AVIRIS data: A first report from Death Valley, California. *Remote Sensing of Environment* 44: 337-356.
- Daunicht, H. J., Bernd, A., Jenrich, H., Struck, R., Werner, D. (1976). Capacidad de uso y manejo de los suelos del valle Matehuala - Huizache, San Luis Potosí, México. *Seminario de Postgraduados para el Desarrollo Rural*. Berlín, Alemania, 153pp.
- De los Ríos, R. F. 1967. Terrenos yesosos en el valle del Ebro. Instituto Nacional de Colonización, Zaragoza, España. Informe inédito, en formato pdf. 24 pp
- FAO/UNESCO, 1968. Clave de unidades de suelos para el mapa de suelos del mundo. Roma, Italia.
- FAO, 1990. Management of gypsiferous soils. *FAO Soils Bulletin* No 62. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. 81 pp.
- García-Calderón, J. 1968. Carta geológica de México, Serie de 1:100 000, Hoja El Salado, 14R – j(11). Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.

- Gobierno de SLP, 2004. Enciclopedia de los Municipios de México, estado de San Luis Potosí. [http://www.e-local.gob.mx/wb2/ELOCAL/EMM\\_sanluispotosi](http://www.e-local.gob.mx/wb2/ELOCAL/EMM_sanluispotosi).
- Gómez-González, A. 1973. Ecología del pastizal *Bouteloua chasei*. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 90 pp.
- Goossens, R., y Van Ranst, E. 1998. The use of remote sensing to map gypsiferous soils in the Ismalia Province (Egypt). *Geoderma* 87: 47-56.
- Goossens, R., Van Ranst, E., Ghabour, T.K. y El Badawi, M. 1999. The use of remote sensing and GIS to detect gypsiferous soils in the Ismalia Province, Egypt. p: 97-102. En: *Nieuwenhuis, G. et alii, (eds) Operational remote sensing for sustainable development Proc. 18<sup>th</sup> EARSeL Symposium, May 1998*. Balkema, Róterdam.
- Grande-López, R. 1987. El yeso y sus mecanismos en el suelo. *Acta Científica Potosina*, IX(1): 30 – 50. UASLP, México.
- Grande-López, R., Hernández X. E., Aguilera, H. N., y Boulaine, J. 1967. Morfología y génesis de suelos yesíferos de Matehuala, S. L. P. *Agrociencia* 1(2): 130 - 147.
- Gutiérrez-Castorena, Ma. del C. 1997. Los suelos de la ribera oriental del ex lago de Texcoco (Macro y micromorfología). Tesis de doctor en ciencias. Colegio de Postgraduados, IRENAT - Edafología, Montecillo, México. 158 pp.
- Hermoso de la Torre, C. 1964. Estudio geológico del área Cerritos-Cárdenas, estado de San Luis Potosí. Tesis de licenciatura, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional. México, D. F. 48 pp.
- Hernando, V., Sánchez Ma. P. C., y Contreras, J. G. 1963. Influencia de los niveles de yeso y de humedad en la fertilidad de un suelo yesoso. *Anales de Edafología y Agrobiología*, Tomo XXII, 7-8: 323 – 337.
- Herrero, J., y Boixadera, J. 2002. Gypsic soils. *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker, Inc. P: 635 – 639.
- Herrero, J., y Porta, J. 2000. The terminology and the concepts of gypsum-rich soils. *Geoderma* 96: 47-61.
- INEGI, 1981. Síntesis geográfica del estado de San Luis Potosí. SPP, D. F., México.
- INEGI, 1985 a 1992. Anuarios estadísticos del estado de San Luis Potosí. SPP, Aguascalientes, Ags., México.
- Jafarzadeh, A. A., y Zinck, J. A. 2000. Worldwide distribution and sustainable management of soils with gypsum. *International Symposium on Desertification*, Konya. Soil Science Society of Turkey. 9 pp. [http://www.toprak.org.tr/isd/isd\\_66.htm](http://www.toprak.org.tr/isd/isd_66.htm).

- Johnston, I. M. 1941. Gypsophily among mexican desert plants. *Journal of the Arnold Arboretum* 22(2): 145 – 170.
- Lagunes-Espinoza, L. del C. 1985. Caracterización química de una serie de suelos ígneos, calcáreos y yesosos del Altiplano Potosino - Zacatecano. Tesis profesional, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, México.
- Laya, D., Van Ranst, E., Herrero, J. 1998. A modified parametric index to estimate yield potencial for irrigated alfalfa on soils with gypsum in Quinto (Aragón, Spain). *Geoderma* 87: 111 – 122.
- López-Ramos. E. 1973. Carta Geológica del estado de San Luis Potosí. 2da edición. Escala 1:500 000. Instituto de Geología de la UNAM, México, D. F.
- Mashali, A. M. 1996. Soil management practices for gypsiferous soils. P: 34 – 52. In: Poch, R. M. (ed.) *International Symposium on Soils With Gypsum*. 15-21 September. Edicions Universitat de Lleida. Lleida, Spain.
- Martín del Campo-Martínez, M. R. 1959. Estudio geológico preliminar de menas aluminosas en el municipio de Guadalcázar, S. L. P. Tesis de Ingeniero geólogo. Facultad Nacional de Ingenieros, UNAM, México, D. F. 50 pp.
- Martínez-Ríos, J. J., y Monger, H. C. 2002. Soil classification in arid lands with Thematic Mapper data. *Terra* 20: 89-100.
- Mellink, E. 1989. La erosión del suelo como una amenaza para las colonias de perro llanero, en el norte de San Luis Potosí. Memorias del VII Simposio sobre fauna silvestre. Noviembre de 1989, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, UNAM, México. P 68 – 76.
- Mellink, E., y Madrigal, H. 1993. Ecology of mexican prairie dogs, *Cynomys mexicanus*, in el Manantial, northeastern Mexico. *Journal of Mammalogy*, 74(3): 631 – 635.
- Meyer, E. S. 1980. The ecology of gypsophily in the eastern Mojave Desert. Dissertation of Doctor of Phylosophy. Graduate Faculty of Botany, Claremont Graduate School. Claremont. 199 pp.
- Meyer, E. S. 1986. The ecology of gypsophile endemism in the eastern Mojave desert. *Ecology*, 67: 1303 – 1313.
- Meyer, S. E., y García-Moya E. 1989. Plant community patterns and soil moisture regime in gypsum grasslands of north central Mexico. *Journal of Arid Environments*. 16:147-155.

- Meyer, E. S., García-Moya, E., y Lagunes-Espinoza, L. C. 1992. Topographic and soil surface effects on gypsophile plant community patterns in central México. *Journal of Vegetation Science* 3: 429-438.
- Mulders, M. A., y Girard, M. C. 1993. Remote sensing of soils in warm arid and semi-arid lands. *Remote Sensing Reviews* 7: 341 – 363.
- Ortiz-Franco, P., y Amado-Álvarez, J. P. 2003. Tecnología para producir maíz con riego por goteo subterráneo. *Folleto Técnico* No 18, CIR-Norte Centro-INIFAP, México. 27 pp.
- Ortlieb, L., y Pierre, C. 1981. Génesis evaporítica en tres áreas supralitorales de Baja California; contextos sedimentarios y procesos actuales. *Revista del Instituto de Geología*, Universidad Nacional Autónoma de México. 5(1): 94 – 116.
- Panah, S. K. A., y Goossens, R. 2000. Contribution of soil salinity to the surface reflectance recorded by landsat MSS and TM sensors. p: 393-403. In Goossens R. and De Vlieghe B. M (Editors) *1<sup>st</sup> Workshop of the EARSeL Special Interest Group on Remote Sensing for Developing Countries, 13-15 September, Gent, Belgium*.
- Soil Survey Staff, 1999. Soil Taxonomy. 2<sup>a</sup> edición. Natural Resources Conservation Service, Agriculture Handbook N° 436. USDA. Washington, D. C. 869 pp.
- Soria-Colunga, J. C. 2004. Génesis, morfología y clasificación de suelos derivados de yeso y caliza en los municipios de Guadalcázar, Villa Hidalgo y Villa Juárez, S.L.P. Tesis de MC. Facultad de Ciencias, UNAM, México, D.F. 182 pp.
- Terrazas-Astorga, J. M. 1985. Respuesta del jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) a la nutrición de K, Ca y Mg en un suelo yesoso de Guadalcázar, SLP, bajo condiciones de invernadero. Tesis profesional, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, UACH., México.
- Urías-Rodríguez, A. 1965. Estudio geológico de la Sierra de Guadalcázar. Folleto técnico No 8. Instituto de Geología y Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, SLP, México. 35 pp.
- Van Alphen, J. G., y de los Ríos, R. F. 1971. Gypsiferous soils. Notes on their characteristics and management. International Institute for Land Reclamation and Improvement. *Bulletin* 12:1-44.
- Verheye, W. H., y Boyadgiev, T.G. 1997. Evaluating the land use potential of gypsiferous soils from field pedogenic characteristics. *Soil Use and Management* 13: 97-103.

- Villanueva-Díaz, J., Juárez-López, A., y Hernández-Reyna, A. 2001. Problemas de salinidad de suelos irrigados de las zonas Media y Altiplano de San Luis Potosí. *Folleto Técnico* No. 11. SAGARPA-INIFAP-CIRNE, San Luis Potosí. 24 pp.
- Villanueva-Díaz, J., y Hernández-Reyna, A. 2001. Opciones productivas para sitios con problema de sales en la Zona Media potosina. *Folleto Técnico* No 16, INIFAP, SLP, México. 21 pp.
- Vonder Haar, S. P., y Gorsline, D. S. 1975. Flooding frequency of hypersaline coastal environments determined by orbital imagery: geologic implications. *Science* 190: 147-149.
- WRB, 1999. Base referencial mundial del recurso suelo. Informes sobre recursos mundiales de suelos No 84. FAO, SICS, ISRIC. Roma. 90 pp.
- Yeaton, R. I., y Flores-Flores, J. L. 2004. Metapopulation ecology of the Mexican prairie dog (*Cynomys mexicanus*) in north-eastern Mexico: An endangered species? Manuscrito en preparación.
- Younis, M. T. 1993. Caracterización y discriminación espectral mediante radiometría de campo e imágenes Landsat-5 TM, de unidades litológicas en el área de Alcantarilla, Murcia. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad de Zaragoza, España. 276 pp.

## **CAPÍTULO II**

### **CARTOGRAFÍA DE LAS ÁREAS YESOSAS DEL ESTADO DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO**

#### **RESUMEN**

Mediante consulta de información cartográfica (de suelos y de geología), de estudios relacionados con suelos ricos en yeso, uso de fotografías aéreas, espaciomapas (imágenes TM del satélite Landsat-5 impresas a escala 1:250 000 en composición RGB432), trabajo de campo y de laboratorio, se indaga la localización y extensión de la superficie yesosa del Altiplano y Zona Media del estado de San Luis Potosí, México. La cartografía de CETENAL fue de gran ayuda en el proceso de cartografía, sobre todo como referencia inicial de la presencia de este tipo de suelo. La superficie yesosa delimitada en el presente estudio (397 258 ha) duplica la extensión (193 907 ha) reportada en la cartografía de CETENAL a escala 1:50 000. Así mismo, se delimitó el área con yeso superficial o somero (horizonte yesoso a menos de 50 cm de profundidad) y con yeso profundo, lo cual es muy útil para planear el manejo de este recurso. Los mapas generados sirven como referencia para estudios específicos, encaminados a evaluar la aptitud de la tierra con fines productivos a escalas grandes, para ello se requiriere realizar cartografía más detallada.

## 1. INTRODUCCION

En las zonas áridas y semiáridas de México, son frecuentes los suelos con alto contenido de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) denominados como suelos yesosos (Herrero y Porta, 2000). Estos suelos se han reportado principalmente en el Desierto Chihuahuense (Grande *et al.*, 1967, Grande, 1987; García, 1968 y 1978; Gómez, 1973; CETENAL, 1971, 1972, 1973, 1975; Meyer y García, 1989; Meyer *et al.*, 1992; Aguilera *et al.*, 1997; CRM, 1992, 1996ab, 1998, y 1999abcd, 2000; Soria *et al.*, 2000; Herrero y Boixadera, 2002, entre otros). Sin embargo, también se les encuentra en el Desierto Sonorense (Vonder y Gorsline, 1975; Ortlieb y Pierre, 1981). La superficie real de este suelo es desconocida y solamente se mencionan datos aislados, por ejemplo, Jafarzadeh y Zinck (2000) indican que en México hay 1 100 000 ha de terrenos yesosos.

Para el estado de San Luis Potosí y con datos de la cartografía edafológica de CETENAL (1971, 1972, 1973 y 1975) a escala 1:50 000, la superficie aproximada es de 96 000 ha en el Altiplano y 97 000 ha en la Zona Media. Dichas cifras se consideran inferiores a la realidad, debido a que solamente toman en cuenta a los Xerosols y Yermosols gípsicos (FAO, 1968), así como otros suelos con fase petrogíptica somera o profunda, sin reconocer varias áreas yesosas, posiblemente debido a un insuficiente trabajo de campo y/o laboratorio.

El reconocimiento previo de campo, con apoyo de imágenes aéreas y satelitales, indica un área yesosa mayor a la anteriormente citada. Por otro lado, en algunas áreas se mencionan suelos yesosos cuando no existen o viceversa. Además de la cartografía de CETENAL (1:50 000 y 1:250 000, 1971, 1972, 1973, 1975) e INEGI (1:1000 000, 1983), se tiene la del Consejo de Recursos Minerales a escala 1:50 000, 1:250 000 y 1:1000 000 (1992, 1996ab, 1998, 1999abcd, 2000), así como algunos estudios geológicos aislados que mencionan áreas yesosas (Martín del Campo, 1959; Hermoso, 1964; Urías, 1965; García, 1968 y 1978; López, 1973), o estudios del hábitat de fauna silvestre (Mellink, 1989; Ceballos *et al.*, 1993; Yeaton y Flores, 2004).

En estos estudios excepto Martín del Campo (1959), Hermoso (1964) y García (1968, 1978) únicamente se menciona la litología yesosa con posibilidad de explotación minera, y al suelo lo consideran como parte del material sedimentario o lacustre sin señalar su distribución y ubicación. Por lo tanto los únicos mapas que hacen mención al suelo yesoso son los de CETENAL (actualmente INEGI), si bien tienen la desventaja de ser antiguos y de haberse hecho basándose en criterios hoy superados, por los avances en los últimos 30 años tanto en

teledetección como en edafología. Así, esos mapas usan la leyenda de suelos FAO/UNESCO (1968), hoy obsoleta; en la actualidad resulta más adecuada, por ejemplo, una leyenda basada en Soil Survey Staff (1999), con ella estos suelos yesosos se clasificarían dentro del suborden Gypsisols, o en la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB, 1999) donde se clasificarían como Gipsisoles.

En el presente capítulo se aborda la localización y la extensión de los suelos ricos en yeso del estado de San Luis Potosí. Esta información, no solamente permitirá planear su manejo sustentable, asegurando su conservación y logrando su utilización acorde a su potencialidad, si no también la investigación para entender los procesos físicos, químicos y biológicos en los suelos con alto contenido de yeso, y los demás recursos asociados al mismo.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A escala mundial existe información incompleta del área exacta de suelos yesosos (Mashali, 1996). En el caso de México, en específico en el estado de San Luis Potosí, prácticamente se cuenta sólo con la cartografía de las áreas yesosas de CETENAL (hoy INEGI) en los mapas o cartas edafológicas a escala 1:50 000 (1971, 1972, 1973 y 1975) y 1:1000 000 (1981a, 1981b). Otra cartografía que hace mención a las áreas yesosas es la geológica, sin embargo, solamente reportan áreas con yeso y/o anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) presentes en las partes altas y con importancia económica como yacimiento mineral.

Uno de los pocos estudios litológicos que hacen mención al material superficial rico en yeso, es el de Martín del Campo (1959) quien menciona afloramiento de yeso (90 ha) en la denominada “Barranca del Yeso”, municipio de Guadalcázar, indicando su ubicación. El Consejo de Recursos Minerales también reconoce esta área en su carta 1:50 000 Hojas Pozas de Santa Ana y Guadalcázar (CRMa, CRMb, 2000), agregan que es parte de la Formación Guaxcamá constituida por secuencia de yesos y anhidritas entre las que se intercalan horizontes de dolomitas, y que su registro estratigráfico se inicia en el Neocomiano-Aptiano, Cretácico Inferior.

Por su parte Hermoso (1964) reporta sedimentos de yeso de origen lacustre posiblemente del Pleistoceno en La Borreguita, y del Aptiano en Guaxcamá. En la última región aflora yeso de color gris claro, blanco y oscuro, y anhidrita. Agrega que dichos materiales fueron depositados en mares someros y de cuenca cerrada con pobre circulación de agua y alta evaporación. Estos afloramientos forman parte de la Formación Guaxcamá (CRM, 1992).

La cartografía que hace referencia a la composición de los materiales de las partes bajas es la de García (1968 y 1978) a escala 1:100 000, pero sólo comprende parte de la región de El Salado, al norte del estado de SLP. En su estudio considera a este material como sedimento aluvial del Cuaternario con alto contenido de yeso. A pesar de su importancia, esta delimitación no tiene continuidad en la cartografía de Padilla (1983), ni en la cartografía geológica minera del CRM (1996b) a escala 1:50 000, hoja San Vicente. En la cartografía edafológica de CETENAL, sí están representados los suelos yesosos de la zona reportada por García (1968 y 1978).

Urías (1965), para la Sierra de Guadalcázar, menciona la presencia de estratos de yeso de posible edad Albiano al techo del Cenomaniano con capas de dolomita intercalada, de unos 250 m de espesor expuesto y algunos depósitos de yeso formados en cuenca cerrada (Albiano temprano o inferior). Estos depósitos tienen una potencia aproximada de 800 m. El yeso se presenta en bandas milimétricas a centimétricas con pliegues muy pequeños y complejos, por lo que es difícil establecer si la deformación se produjo durante la sedimentación debido a deslizamientos submarinos de los depósitos dolomíticos, o se deben a su plasticidad como respuesta a los esfuerzos que causaron plegamiento de toda la sucesión Mesozoica. Este autor, también dice que la gran mayoría de los geólogos pasan por alto el estudio de los depósitos aluviales como unidades estratigráficas.

Por otra parte, López (1973) en su estudio geológico del estado de San Luis Potosí escala 1:500 000, también reporta afloramientos de yeso con espesor mayor a 200 metros, mencionando la Formación Guaxcamá, pero sin especificar su ubicación, y diciendo que está constituida por anhidrita, yeso y caliza. El mismo autor para 1976, también indica la existencia de afloramientos de las Formaciones Olvido (anhidritas, yesos, calizas y lutitas) y La Casita (conglomerados, areniscas, lutitas, margas, calizas, yesos y carbón). Sin embargo, en ambas publicaciones, a las áreas bajas con suelos yesosos las incluye dentro de los sedimentos aluviales o lacustres del Cuaternario.

El Consejo de Recursos Minerales (CRM) reporta áreas yesosas, tal es el caso de los distritos mineros Guaxcamá y La Borreguita en la Zona Media, en los que el yeso litológico es un componente muy importante (CRM, 1992). En la cartografía geológica del estado de San Luis Potosí tanto a escala 1:500 000, 1:250 000 (CRM, 1996a, 1998, 1999abc) como a 1:50 000 (CRM, 1996b, 1999d, 2000) reporta litologías de yeso.

El CRM no reporta la composición del material de las partes bajas donde se ubican los suelos con yeso, cartografiándolos como material aluvial. Por ejemplo en la carta San Vicente (Hoja G14-C84, escala 1:50 000), municipio de Vanegas, las partes bajas se cartografía como sedimentos aluviales del Cuaternario (CRM, 1996b).

Respecto a mapas de suelos solamente existe la cartografía de CETENAL, actualmente INEGI, a diversas escalas (1:1000 000 a 1:50 000) y obtenida hace 30 años o más, la superficie representada en dichos mapas está por abajo de la realidad. Su actualización es

indispensable, aprovechando para ello los avances en teledetección y edafología. Por otro lado, la SEMARNAP (1999) ha publicado una generalización cartográfica basada en los mapas de INEGI escala 1:1000 000. En su mapa no toma en cuenta a los Gypsisoles a pesar de ser cartografiables a la escala de publicación (1:4000 000), y a los suelos yesosos los cartografía como Calcisoles.

Aunado a lo anterior, en la cartografía se siguieron criterios hoy superados por los avances en los últimos 30 años. Así, esos mapas usan la leyenda de suelos FAO/UNESCO (1968), hoy obsoleta. De los avances en la Leyenda FAO, resalta el que en 1968 consideraba a los suelos con horizonte gípsico o petrogípsico a nivel de fase, y en 1988 introduce la unidad de suelo Gypsisols (FAO, 1988), nombre que la WRB (1999) mantiene como suelo de referencia o como unidad de nivel inferior de otros suelos de referencia.

Asimismo se han generado otros términos relacionados con el yeso, por ejemplo, el horizonte hipergípsico con contenido de yeso mayor a 60 % y espesor de al menos 15 cm, y material de diagnóstico gipsírico cuando el suelo mineral tiene 5 % o más de yeso en volumen (WRB, 1999).

El reconocimiento del papel del yeso en Soil Taxonomy es posterior a los mapas de CETENAL tal como lo señala Cline (1979). Por ejemplo en la 7th Approximation (Soil Survey Staff, 1960) los suelos con horizonte Gypsic se clasifican como Calcic Camborthids o Calcorthids. Hasta la primera edición de Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975) el interés por los suelos ricos en yeso toma importancia al ser considerados a nivel del gran grupo Gypsiorthids. En 1994 se crea el suborden Gypsids (Soil Survey Staff, 1994), el cual se llevó a la segunda edición de Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999), además como horizonte gípsico o petrogípsico se utiliza a nivel de gran grupo (Ej. Gypsiusterts) y de subgrupo (Ej. Gypsic Calciustolls).

Con estos avances en taxonomía de suelos, resulta más adecuada, por ejemplo, una leyenda basada en Soil Survey Staff (1999), con ella estos suelos yesosos se clasificarían principalmente como Gypsids, y como Gypsisols con la WRB (1999). Con lo mencionado hasta el momento, resalta la necesidad de generar y/o actualizar la cartografía de los suelos ricos en yeso, lo cual se convierte en la razón de ser del presente capítulo.

### 3. OBJETIVO

El objetivo del presente capítulo es conocer la localización y extensión de las áreas yesosas de la Zona Media y del Altiplano Potosino, México.

### 4. MATERIALES Y MÉTODO

#### 4.1. Características de las dos áreas de estudio.

**4.1.1. Localización.** El estudio se ubica en dos zonas con terrenos yesosos del estado de San Luis Potosí, uno en el Altiplano Potosino y otro en la Zona Media. La primera tiene por coordenadas  $22^{\circ} 55' - 24^{\circ} 33' N$  y  $100^{\circ} 23' - 101^{\circ} 05' O$ , y la segunda  $21^{\circ} 49' - 22^{\circ} 53' N$  y  $99^{\circ} 40' - 100^{\circ} 19' O$ . En el Altiplano comprende parte de los municipios de Cedral, Guadalcázar, Matehuala, Real de Catorce, Vanegas y Villa de Guadalupe, y en la Zona Media parte de Cerritos, Ciudad Fernández, Ciudad del Maíz, Rioverde y Villa Juárez (Figura II.1). La extensión estudiada es aproximadamente de 200 000 ha en el Altiplano y de 250 000 ha en la Zona Media.

**4.1.2. Clima.** En la región plana de la Zona Media, la altitud varía de 980 m en Rioverde y Ciudad Fernández a 1110 m en Villa Juárez y 1080 m en Granjenal, predominando la altitud de 1000 a 1030 m; Cerritos se localiza en las estribaciones de la sierra y por ello está a mayor altura (1135 m). En las sierras circundantes se tienen altitudes de 1550 m al este de San Francisco, de 1370 m en el cerro La Mesa ubicado al sur de Guaxcamá, de 1460 en la Sierra Palomas y de 1250 m en el cerro La Artesa al norte de la Zona Media.

En las partes bajas del Altiplano también se presenta un gradiente altitudinal, siendo más alto hacia el norte con altitudes de 1730 m en El Salado y 1720 m en San Vicente. En Cedral la altitud es de 1700 m y en Matehuala de 1575 m. Al sur la altitud desciende a 1330 m en El Milagro de Guadalupe y a 1320 m en Vallejo. Respecto a las sierras, la más alta es la Sierra de Catorce con 3070 m en el Cerro Grande; al norte del Altiplano se alcanzan los 2450 m en la Sierra Papagayos situada al oeste de El Salado, y en la parte sur del Altiplano se tienen 2160 m al este de El Milagro de Guadalupe, y 1800 m al oeste de Vallejo.

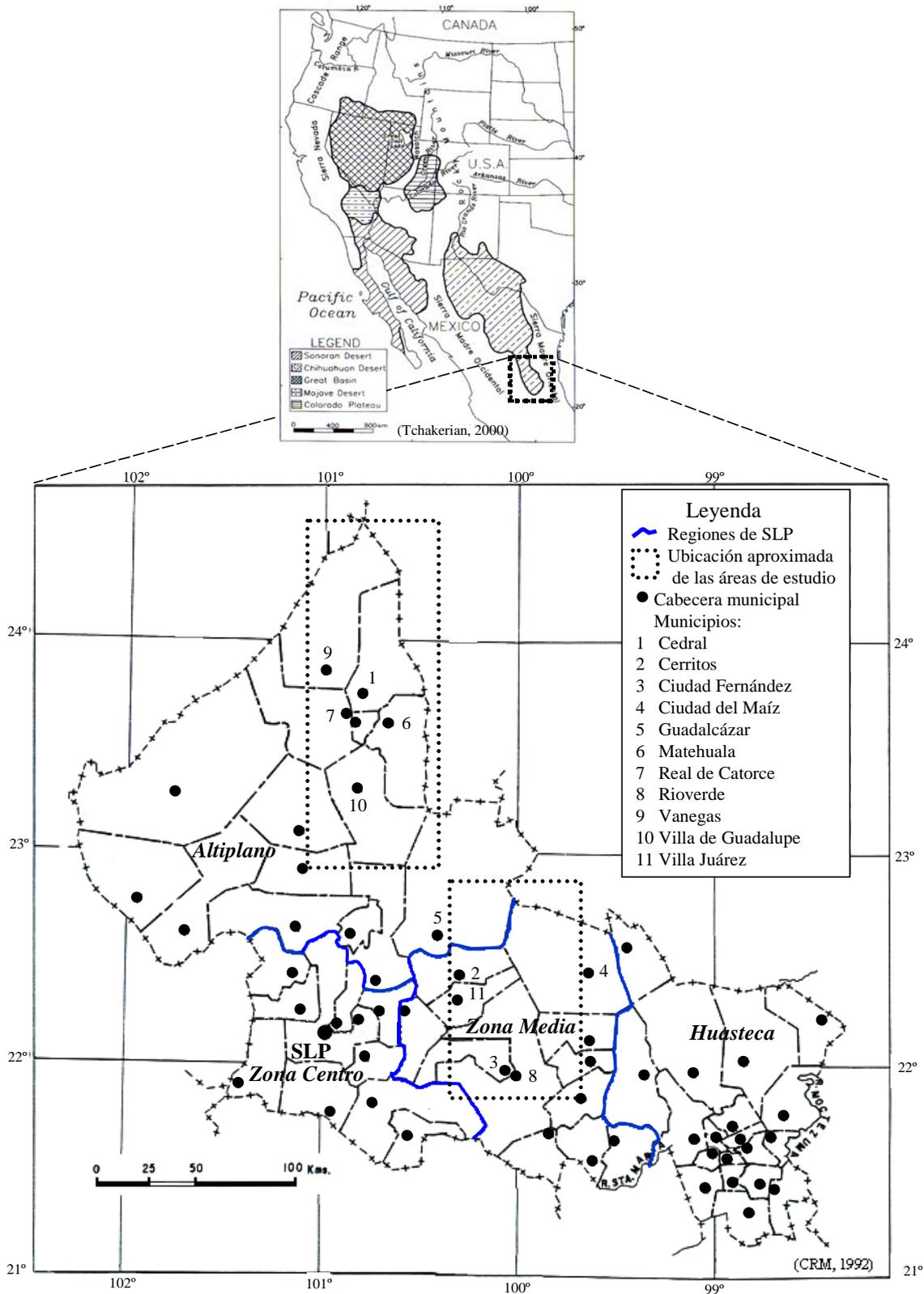


Figura II.1: Localización de los municipios y ubicación aproximada de las áreas de estudio, Altiplano y Zona Media, San Luis Potosí, México.

En la Zona Media el clima predominante, de acuerdo al sistema de clasificación climática de Köppen adaptado a México por García (1973), es el más húmedo de los secos esteparios o semiárido [BS<sub>1</sub>hw(w)] con precipitación promedio anual de 300 a 620 mm siendo más húmedo en Cerritos y Rioverde y más seco en la región norte; el régimen de lluvias es de verano. La temperatura media anual está entre los 18 y 22 °C.

El clima del Altiplano es más seco predominando el seco estepario en su fase menos húmeda [BS<sub>0</sub>hw(w)], y en el caso de Vanegas y El Salado el clima es seco desértico, BW (Tabla II.1). La precipitación media anual varía de 290 a 470 mm siendo más seco en la región de El Salado y más húmedo en Matehuala; el régimen de lluvias es de verano (Figura II.2). En el Altiplano la temperatura media anual varía de 17.4 a 19.3 °C (García, 1973 y 1988; Figura II.2 y Anexo II.1).

Tanto en el Altiplano como en la Zona Media la evaporación es muy alta (Figura II.2 y Anexo II.1. CNA, 2000), y su valor medio anual sobrepasa varias veces al de la precipitación presentándose déficit hídrico, inclusive en el mes más lluvioso (Figura II.2). Por ejemplo en la estación meteorológica Pastora la evaporación media anual puede ser hasta 4.2 veces la precipitación, de 3.5 veces en Cerritos y Villa Juárez, y de 3.1 veces en Rioverde (Anexo II.1). Algunos datos del clima de la CNA (2000) hay que tomarlos con reserva debido a que representan un periodo no mayor de 10 años, en especial los de las estaciones La Morita, Las Tablas y La Libertad (Anexo II.1), pueden no ser representativos del comportamiento real de los parámetros del clima.

**4.1.3. Fisiografía.** El territorio del estado de San Luis Potosí se divide en tres grandes regiones fisiográficas, originadas debido a que la Sierra Madre Oriental atraviesa al Estado por la parte central, en dirección Sureste a Noroeste. Hacia la vertiente del Golfo de México se forma la Llanura Costera del Golfo Norte, correspondiendo a la región de la Huasteca. La parte media del estado corresponde a la Sierra Madre Oriental conformada por sierras, valles o llanuras (Ej. Llanura de Rioverde) y lomeríos. En parte del Altiplano y Zona Centro se tiene la Mesa o Altiplano Central y comprende la parte árida y semiárida del estado. Esta provincia fisiográfica está conformada por sierras aisladas, llanuras, mesetas, lomeríos y pequeños valles (Figura II.3).

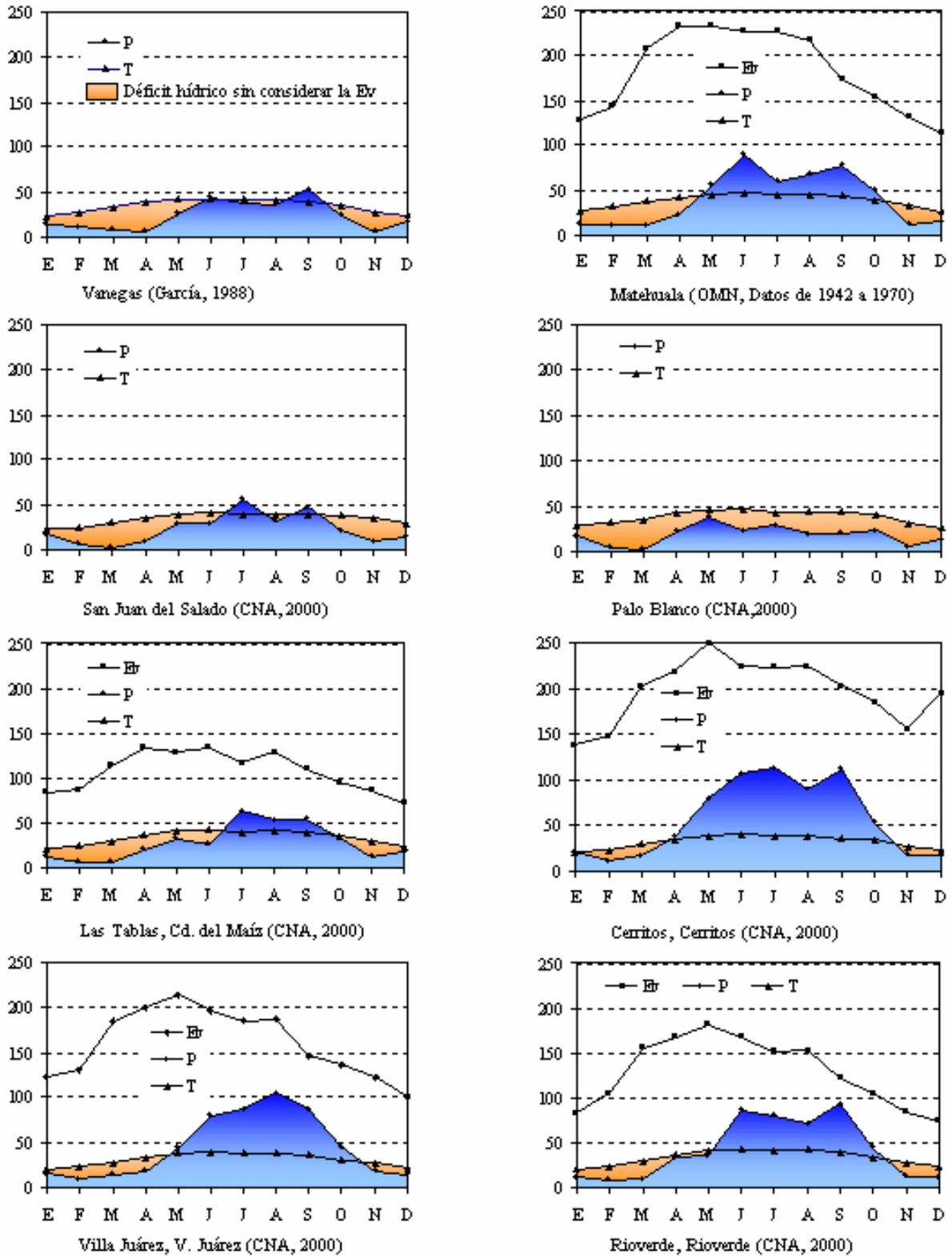


Figura II.2. Diagramas ombrotérmicos de algunas estaciones meteorológicas del Altiplano (Vanegas, San Juan del Salado, Mathuala y Palo Blanco) y de la Zona Media (Las Tablas, Villa Juárez, Cerritos y Rioverde), San Luis Potosí. Datos mensuales. Temperatura multiplicada por 2 (T, °C), Precipitación (P, mm) y Evaporación (Ev, mm).

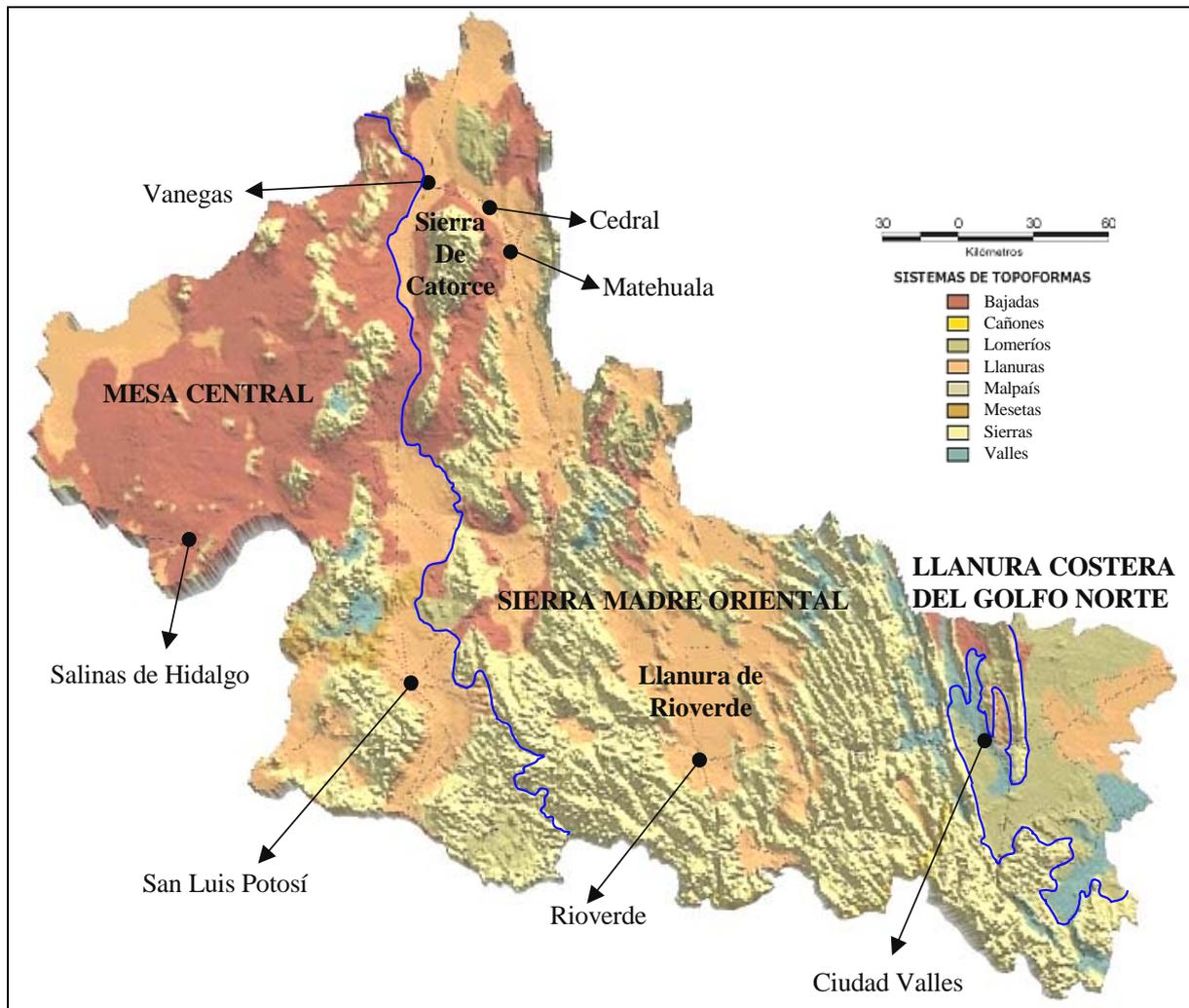


Figura II.3. Provincias fisiográficas del estado de San Luis Potosí (INEGI, 1983), delineación propia a mano alzada sobre la representación tridimensional del estado (PDUSLP, 2000).

**4.1.4. Suelos.** La cartografía de CETENAL (1971, 1972, 1973 y 1975) utiliza las claves de la Leyenda de Suelos de FAO (1968) modificada por la propia CETENAL en 1970 (INEGI, 2001) sin especificar dichas adecuaciones. Según la cartografía, en el área de estudio, tanto en el Altiplano como en la Zona Media, predominan los Xerosols háplico, cálcico y gípsico, le sigue en importancia el Solonchak órtico y el Litosol éutrico. Una de las diferencias entre las dos demarcaciones, es que en la Zona Media no se reportan Yermosoles y en el Altiplano sí.

Tabla II.1. Precipitación, evaporación (P y Ev) y tipo de clima (sistema climático de Köppen adaptado a México por García, 1973) para varias estaciones meteorológicas de SLP.

Estación meteorológica	P <sup>a</sup> , mm	Ev <sup>a</sup> , mm	P/T <sup>b</sup>	% P Inv <sup>b</sup> .	Clima <sup>b</sup>
Cerritos	671	2372	21.8	28.4	BS <sub>1</sub> hw(e)gw''
Matehuala	479.2 <sup>c</sup>	2196 <sup>c</sup>	24.3	07.6	BS <sub>1</sub> hx'(w)(e)w''
Rioverde	501.4	1555	24.5	04.8	BS <sub>1</sub> hw(w)(e)gw''
Guadalcázar	722 <sup>b</sup>	-	39.7	09.3	(A)Ca(x')(wo)(e)gw''
El Huizache	336 <sup>b</sup>	-	16.1	10.0	BS <sub>0</sub> hx'(w)(e)gw''
La Maroma	356 <sup>b</sup>	-	20.4	10.4	BS <sub>0</sub> hx'(w)(e)w''
Pastora	404	1692	18.7	08.0	BS <sub>0</sub> (h')hw(e)w''
Vanegas	292 <sup>b</sup>	-	16.4	12.3	BWkx'(w)(e)gw''
Villa Juárez	545	1924	26.1	07.7	BS <sub>1</sub> hx'(w)(e)g
La Morita <sup>a</sup>	291	1588	16.7		
Las Tablas <sup>a</sup>	359.2	1299	20.9		

<sup>a</sup> CNA, 2000; <sup>b</sup> García, 1988; <sup>c</sup> SMN (1976) periodo 1941-1970. P inv = Precipitación invernal

**BS<sub>1</sub>**: El menos seco de los climas secos desérticos o semiáridos, BS, y cociente Precipitación/Temperatura, P/T >22.9; **BS<sub>0</sub>**: El más seco de los BS y P/T < 22.9; **BW**: Clima árido o desértico; **k**: Templado, verano cálido, temperatura media anual de 12 - 18°, del mes más frío -3 - 18° y del mes más caliente > 18°; **(w)**, **w''**: Régimen de lluvias de verano; **(e)**: Extremoso, oscilación anual de la temperatura media mensual entre 7 y 14°; **g**: Marcha anual de la temperatura tipo Ganges, es decir el mes más caliente se presenta antes del solsticio de verano (21 de junio); **h**: Semicálido, temperatura media anual entre 18 y 22°, y del mes más frío < 18°; **(h')**: Cálido, temperatura media anual > 22°, y del mes más frío > 18°. **x'**: Régimen de lluvias intermedio al del verano e invierno (García, 1973).

En la Zona Media también reportan la presencia de Solonchak gléyico, Vertisol pélico y Castañozem cálcico, los cuales no se cartografiaban en el Altiplano. Los suelos yesosos son considerados por CETENAL a nivel de subunidad dentro de los Xerosols gypsico y Yermosols gypsico (Xy, Yy, respectivamente), o como fase petrogípsica o petrogípsica profunda (capa subsuperficial fuertemente cementada por “sulfato de calcio” –de acuerdo a la definición y al uso que le dan se refieren al yeso aunque no lo expresan correctamente- dentro de los 50 cm o entre los 50 y 100 cm de profundidad, respectivamente, INEGI, 2001) acompañando a otras unidades de suelos o subunidades de los Xerosols y Yermosols.

**4.1.5. Vegetación.** Los principales tipos de vegetación son: **Matorral Desértico**, el cual, de acuerdo al predominio de plantas sin espinas (gobernadora) o con espinas, generalmente es dividido en **Matorral inerme (Mi)** Gobernadora [*Larrea tridentata* (Moc. & Sessé ex D. C.) Coville], Hojasén (*Flourensia cernua* D. C.) e hierba del burro (*Franseria dumosa* Gray); **Matorral subinerme (Ms)** barreta (*Helietta parviflora* (A. Gray) Benth.), granjeno (*Celtis pallida* Torr.), acebuche (*Forestiera* sp.) y cenizos (*Leucophyllum* sp.) y **Matorral espinoso (Me)** huizache [*Acacia farnesiana* (L.) Willd], mezquite (*Prosopis laevigata* (Willd.) M. C. Johnst.), chaparro prieto (*Acacia amentacea* D. C.), tepame [*Acacia pennatula* (Schlecht. & Cham.) Benth.].

**Izotal (Iz)** palma china [*Yucca filifera* Chabaud, *Y. dicipiens* Trel., *Y. carnerosana* (Trel.) McKelvey], etc. **Mezquital (Mz)** su componente principal es *Prosopis* sp., encontrándose también el granadillo (*Maytenus phyllantoides* Benth.) –solamente en áreas salinas de la Zona Media-, *Opuntia* sp., granjeno (*Celtis pallida* Torr), junco (*Koeberlinia spinosa* Zucc.), zacate búfalo [*Buchloe dactyloides* (Nutt) Engelm.], costilla de vaca (*Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.), romerito (*Suaeda mexicana* Gray, *S. nigrecens* I.M Johnston), pasto o zacate banderita (*Bouteloua chasei* Sw), etc.

**Pastizal (Pn)** compuesto por pasto navajita (*Bouteloua chasei* Sw), pasto liendrilla (*Muhlenbergia purpusii* Mez, *M. villosa* Swallen, *M. porteri* Scribner ex Beal), zacate salino [*Sporobolus airoides* (Torr.) Torr.], gobernadora [*Larrea Tridentata* (Moc. & Sessé ex D. C.) Coville], etc. En la Zona Media predomina el Mezquital y en el Altiplano el Matorral desértico (CETENAL, 1971, 1972, 1973 y 1975).

**4.2. Método.** El método de trabajo que se siguió para alcanzar el objetivo planteado, constó varias actividades desarrolladas en tres etapas: precampo o gabinete, campo y postcampo y/o gabinete. El esquema general de método se presenta en la Figura II.4.

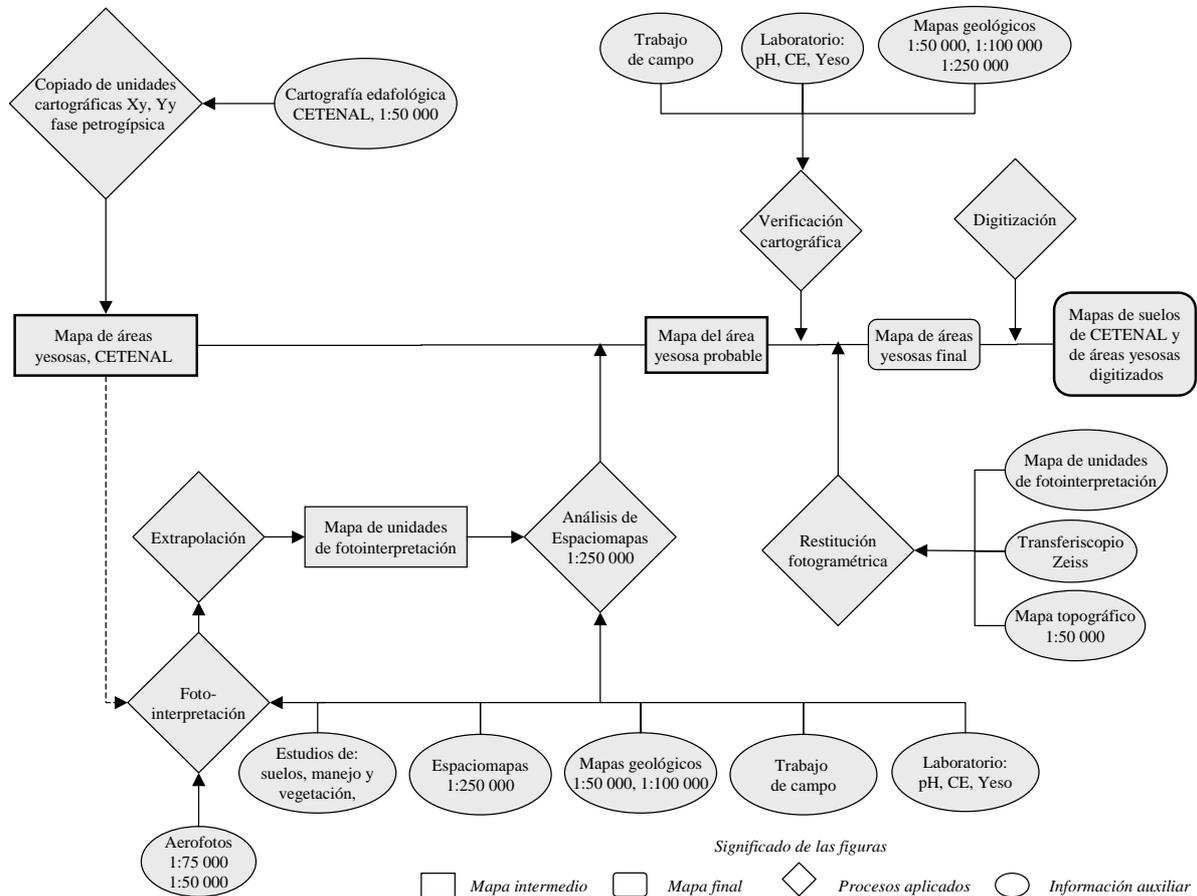


Figura II.4. Esquema del método de trabajo.

**4.2.1. Etapa de precampo o gabinete.** Esta fase comprende actividades, tales como: revisión bibliográfica relacionada con aspectos de cartografía; copiado de linderos de terrenos yesosos; recorridos de campo; fotointerpretación; y análisis visual de espaciomapas. El último material consiste de imágenes del satélite Landsat-5 en composición falso color RGB432 e impresas a escala 1:250 000 (INEGI, 1995). Esta actividad se desarrolló en dos pasos:

**4.2.1.1. Delimitación del área yesosa reportada por CETENAL.** Como suelo yesoso se entiende a las unidades cartográficas Xerosoles o Yermosoles gypsicos, u otras unidades con fase petrogípsica somera o profunda de CETENAL (hoy INEGI) y que es reconocible en campo como farinoso, pulverulento, vermiforme o a veces se observan a simple vista los granos de yeso; o al suelo con horizontes cuyo material suelo, después de agitado en agua y

filtrado, produce precipitado blanco lechoso al reaccionar con la acetona y sin llegar a su cuantificación, el método se detalla en el Apartado 4.2.3.1.

La primera actividad consistió en el análisis de la cartografía edafológica de CETENAL a escalas 1:50 000 a 1:1000 000, con ello se conocieron las áreas yesosas cartografiadas dentro del estado de San Luis Potosí. Se revisaron los estudios geológicos para con ello conocer los reportes de yacimientos o depósitos yesosos. Asimismo, se analizaron las publicaciones relacionadas con suelos yesosos en general (taxonomía, vegetación, manejo, etc.), para tener referencias directas sobre este tipo de suelo. Con el propósito de conocer y familiarizarse con los suelos yesosos, previamente se realizaron recorridos de campo de las áreas yesosas reportadas.

De la cartografía publicada, se trabajó con la información a escala 1:50 000 de CETENAL (1971, 1972, 1973 y 1975) por considerarse más precisa. Se copiaron las unidades cartográficas de suelos yesosos Xerosol gípsico y Yermosol gípsico (Xy y Yy, respectivamente), o de otras unidades de suelos con fase petrogípsica o petrogípsica profunda (capa subsuperficial fuertemente cementada con “sulfato de calcio” \_se refieren al yeso aunque lo citen mal\_ a menos de 50 cm o entre 50 y 100 cm de profundidad, respectivamente, INEGI, 2001). Los linderos copiados se digitizaron utilizando el programa CartaLinx v.2 de IDRISI y se editaron con ArcView 3.2. Se generaron dos mapas, uno para el Altiplano y otro para la Zona Media (Mapas II.1 y II.2).

**4.2.1.2. Delimitación del área yesosa probable.** A partir de los Mapas II.1 y II.2 del anexo II se extrapolaron las áreas yesosas mediante fotointerpretación y análisis visual de los espaciomapas. Los espaciomapas se utilizaron por dos razones: para aprovechar las tonalidades en falso color de las tierras yesosas en las áreas para las que no se tuvieron fotografías aéreas (45 % en el Altiplano y 40 % en la Zona Media); la otra razón fue para tener una perspectiva general de las áreas yesosas en falso color y que no se puede apreciar en las fotografías aéreas debido a su mayor escala.

Fueron de gran ayuda los estudios geológicos de García (1968 y 1978) a escala 1:100 000 correspondientes a la región de El Salado, Altiplano Potosino, y en los que hace mención al material de las partes bajas con alto contenido de yeso; complementando tanto la cartografía de CETENAL como facilitando el análisis visual de los espaciomapas en las áreas sin

fotografías aéreas. Con la información cartográfica (de CETENAL, estudios geológicos, fotografías aéreas y espaciomas) y con información de campo, se generó el mapa denominado de área yesosa probable (Mapa II.3).

Para generar este mapa, primero se fotointerpretó dentro de las áreas yesosas reportadas por CETENAL y con base al patrón de fotointerpretación de dichas áreas (variación de tono, textura fotográfica, etc.) se extrapoló a áreas contiguas con patrón fotográfico similar. Para la Zona Media se utilizaron fotografías de 1967 y 1969 (de la Reforma Agraria Nacional, RAN, delegación San Luis Potosí) escala 1:50 000, cubriéndose cerca de un 60 % del área. Para el Altiplano se usaron fotografías escala 1:50 000 de 1967 (del Campus SLP-CP), cubriendo 55 % del área de interés. Se usaron fotografías a escala 1:25 000 y 1:75 000 de los vuelos 1995 y 1996, de algunas áreas no cubiertas a escala 1:50 000. La fotointerpretación se hizo con un estereoscopio de espejos marca Zeiss.

Con base a los resultados de la fotointerpretación se realizó el análisis visual de los espaciomas únicamente en las áreas donde no se tenían aerofotos. Se transfirieron los linderos externos de los mapas de fotointerpretación correspondientes a los límites del área yesosa prospectada, guiándose por las tonalidades claras, azulosas o gris-verde de las áreas yesosas y por el relieve que se aprecia en las imágenes impresas. Este mapa se denominó como área yesosa probable porque en los recorridos de campo nos percatamos de áreas yesosas no cartografiadas por CETENAL, y de otras reportadas como tales pero que no lo eran, requiriéndose verificación en campo. Estos recorridos junto a la extrapolación descrita, dieron como resultado el Mapa II.3 del Anexo II.2.

Se delinearon dos tipos de superficies o de unidades cartográficas, una de ellas correspondió a las zonas con alta certeza de ser yesosas, denominada “área yesosa probable”; y la otra, a las partes donde existía menos posibilidad de encontrar suelos con yeso, pero que sin embargo tenían algunos rasgos de fotointerpretación (por ejemplo la tonalidad gris tenue, aunque un poco más oscuro) y aspecto en los espaciomas similares a las áreas yesosas, nombrada “área yesosa menos probable” (Mapa II.3). Esta división fue muy útil como guía para la verificación cartográfica en campo.

Los espaciomas fueron de gran ayuda en las áreas sin fotografías aéreas, permitiendo continuar con la delimitación de los linderos de zonas yesosas, con ayuda del patrón de

interpretación visual de los suelos ricos en yeso. Es decir, se consiguió la interacción entre fotografías aéreas y espaciomapas. En esta fase el espaciomapa fue el mapa base, y el definitivo fue el topográfico a escala 1:50 000. De esta forma se delimitó el área yesosa probable completa (que incluye la superficie yesosa de CETENAL) en los espaciomapas y parte en las fotografías aéreas. Tanto la fotointerpretación como el análisis visual se apoyaron en información previa recogida en recorridos de campo exploratorios.

El mapa generado no se digitizó hasta después de la verificación cartográfica, cuando ya se tenían los linderos definitivos. Las áreas yesosas delimitadas, tanto del Altiplano como de la Zona Media, se comprobaron mediante trabajo de campo y laboratorio en la siguiente fase.

**4.2.2. Etapa de campo, verificación cartográfica.** Esta fase consistió en la *verificación de la cartografía* generada a partir de fotointerpretación y delimitación del área yesosa completa en los espaciomapas (Mapa II.3). Como información auxiliar en campo se utilizaron los mapas geológicos (García, 1968 y 1978), de vegetación y uso del suelo, y topográficos (CETENAL, 1971, 1972, 1973, 1975), sobre todo para ubicar los sitios de comprobación y conocer las vías de comunicación a utilizar. Para cotejar los linderos se recorrió el campo en transectos de acuerdo a la accesibilidad y necesidades de confirmación o de detección de áreas yesosas, empezando por donde se tenían más dudas de la presencia de yeso.

De acuerdo a lo observado en campo se señalaban los linderos a corregir, tanto en el espaciomapa como en las fotografías aéreas; reubicando tentativamente los linderos, sobre todo en el espaciomapa. El trazo definitivo se hizo en gabinete con nueva fotointerpretación y análisis visual del espaciomapa. Durante el trabajo de campo se vio la conveniencia de dividir el área yesosa final en dos unidades cartográficas, de acuerdo a la profundidad a que aparece el horizonte yesoso; de esta forma se generaron las unidades cartográficas yeso somero (áreas con horizonte yesoso en los primeros 50 cm) y yeso profundo (presencia de horizonte yesoso a más de 50 cm de profundidad) en esta unidad cartográfica el suelo del horizonte superficial y a veces subsuperficial no produjo precipitado blanco al reaccionar con acetona, deduciéndolo el bajo contenido del mismo en dichas muestras.



a) Suelo yesoso extraído por hormigas



b) Suelo yesoso extraído por topos



c) Planta gipsófila, *Muhlenbergia purpusii*



d) Planta gipsófila, *Flaveria sp.*



e) Dolina en suelo yesoso



f) Colonia del perrito de las praderas en suelo yesoso, *Cynomys mexicanus*



g) Extracción del “cuartón” o “sillar”



h) Actividad minera. Cantera de yeso “Don Pedro”

Figura II.5. Rasgos del paisaje que indican la presencia de suelo yesoso.

En cada salida al campo, sobre todo en los primeros días, se incluían áreas yesosas para familiarizarse con este tipo de suelo. En cada sitio se identificaba la actividad de las hormigas (Figura II.5a) y de pequeños roedores (Figura II.5b) sobre todo en suelos con horizonte superficial de color oscuro y cartografiado por CETENAL como Vertisol. Igualmente se veía la presencia de plantas gipsófilas, tal es el caso del pastizal gipsófilo (*Muhlenbergia villiflora* Hitchc., *Muhlenbergia purpusii* Mez y *Bouteloua chasei* Sw (navajita salada) y Gualdria o flor amarilla (*Flaveria anomala* B. L. Rob y *Flaveria oppositifolia* (DC) Rydb.). Estas dos, así como *Dichranocarpus parviflorus* Gray, las menciona Grande (1967) como indicadores de suelo con yeso para la región del Altiplano, si bien la última no se localizó en campo (Figura II.5c y II.5d).

También se verificó la presencia de dolinas o hundimientos del terreno (Figura II.5e). En el Altiplano además se tomó como indicador de la presencia de yeso la actividad del perrito de las praderas (*Cynomys mexicanus*), cuyo hábitat es el área yesosa (Mellink, 1989; Ceballos *et al*, 1993; Yeaton y Flores-Flores, 2004), (Figura II.5f).

Otro aspecto muy importante consistió en entrevistas a productores, con relación a la presencia del material yesoso y la existencia de túneles o “abras” frecuentes en las áreas agrícolas de riego. Un detalle importante fue la identificación de lugares de obtención de “cuartón” (conocido también como “sillar”, “terrón” o “piedra”) a partir de materiales yesosos, utilizado como material principal en la construcción de casas habitación (Figura II.5g). Se visitaron algunas minas de extracción de yeso a cielo abierto (canteras), tales como “La Borreguita” y “Don Pedro” (Figura II.5h) ubicadas en las partes bajas. El yeso extraído se procesa industrialmente para su uso en acabados y recubrimientos de las edificaciones, fabricación de paneles de yeso como la “tablaroca”, etc; también es utilizado en medicina, en cerámica, etc.

En cada sitio, conjuntamente a la existencia de yeso, se registró la profundidad a la que se encontraba el horizonte yesoso, donde fue necesario se verificó la presencia o no del yeso hasta profundidad mayor al metro. Tanto los transectos como el número de sitios de verificación del mapa de área yesosa probable, dependieron de la variabilidad del área, accesibilidad, cantidad de información, así como de la experiencia que se fue generando en la detección y reconocimiento de los suelos ricos en yeso. En la Zona Media se tomaron datos en 158 sitios y en el Altiplano en 139.

La verificación cartográfica se considera como la primera campaña de campo ejecutada de abril a diciembre de 1999 y en enero-febrero, julio, y septiembre-noviembre del 2000. Se realizaron otras dos campañas de campo con fines diferentes a los de la verificación cartográfica, así del 10 al 12 y del 23 al 24 de febrero del 2000 se muestrearon los perfiles de suelos descritos en el cuarto capítulo, y el 24 de agosto del 2000 se hizo una tercera campaña para conocer la fertilidad del suelo. La Figura II.6 resume la secuencia de generación del mapa de áreas yesosas final.

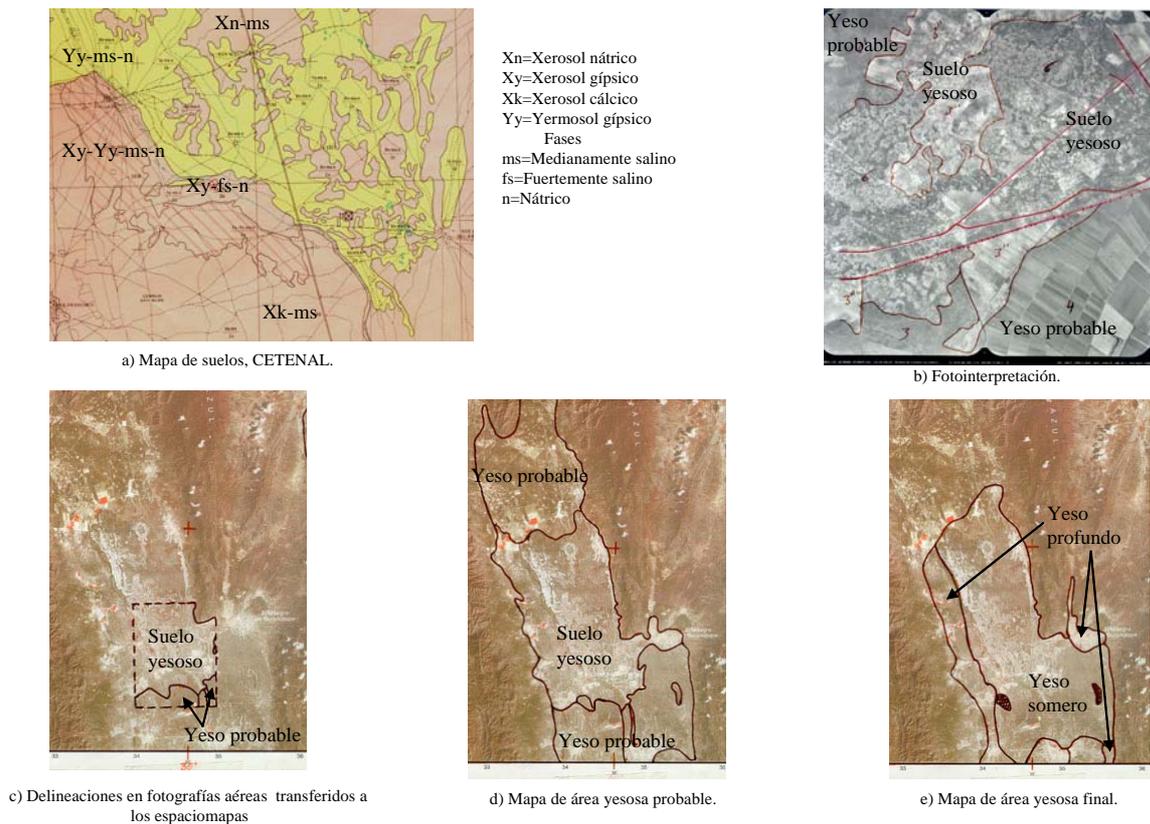


Figura II.6. Proceso de obtención del mapa de áreas yesosas final con base a mapas de CETENAL, fotografías aéreas, espaciomapas, y trabajo de campo y laboratorio.

En casi todos los sitios de verificación se tomaron muestras de suelo principalmente del horizonte yesoso o que se deseaba confirmar (en lo sucesivo horizonte subsuperficial) y en algunos sitios del horizonte superficial (en lo sucesivo horizonte superficial), sobre todo en los lugares donde había duda de la existencia de yeso. No se muestreó el suelo cuando había seguridad de la presencia de yeso, dado su similitud a sitios previos en los que ya se había hecho la determinación cualitativa del mismo. En cada sitio se hacían anotaciones sobre las condiciones del terreno y tipo de vegetación colectando especies cuando era posible. El

muestreo del suelo y exploración a profundidad requirió el uso de “pocera” o “gafas”, palas y zapapicos (“talache” o “talacho”) y/o de barrena. Las coordenadas de los primeros sitios se registraron usando mapas topográfico escala 1:50 000 y posteriormente con GPS (Garmin 12XL). Para la altitud se utilizó un altímetro Thommen Classic.

**4.2.3. Etapa de postcampo.** En esta etapa se realizaron varias actividades, tales como el análisis de pH, CE y de yeso en las muestras de suelos colectadas en los sitios de verificación cartográfica; interpretación de las dos primeras variables; indagar la relación del pH y CE con las sales solubles, yeso y carbonatos en muestras de suelo colectadas en otras campañas y para otros fines; también se hizo la restitución fotogramétrica y la digitización de los mapas.

**4.2.3.1. Análisis químico de suelos.** Para los análisis las muestras de suelo colectadas en los sitios de verificación cartográfica (66 en el Altiplano y 142 en la Zona Media correspondientes a la primera campaña de campo, Tablas II.4 y II.5) se secaron al sol y se tamizaron con malla de 2 mm de abertura. En ellas se determinó el pH con potenciómetro Wand y la CE dS/m a 25 °C con conductivímetro, ambos de la marca Oakton. Ambas determinaciones se hicieron en relación suelo:agua 1:5. Para indagar el efecto de la dilución en la reacción del suelo, a 30 muestras se les determinó el pH a diluciones de 1, 2.5, 5 y 10. Para indagar la diferencia de la conductividad eléctrica medida en extracto de saturación ( $CE_{es}$ ) con la determinada a varias diluciones y poder interpretar el grado de salinidad, a 14 de las anteriores 30 muestras también se les determinó la CE a las mismas diluciones que para el pH. Además se analizó cualitativamente la presencia de yeso con la técnica de la acetona (Jackson, 1982). El yeso se extrajo con agua destilada en relación 1:10, después de una hora de agitación se filtró con papel filtro Whatman No 2. Al filtrado se le aplicó 10 ml de acetona, considerando como reacción positiva la presencia de precipitado blanco lechoso (Figura II.7).



Figura II.7. Prueba cualitativa de la presencia de yeso, el precipitado blanco lechoso indica reacción positiva.

**4.2.3.2. Interpretación del pH y CE.** Para la evaluación del pH y CE existen varios criterios, los más conocidos son los de la Soil Survey División Staff (1993), que retoman Porta *et al.* (2003) haciendo algunos cambios (Tabla II.2). La evaluación, tanto del pH como de la CE, se hizo con base a Soil Survey División Staff (1993) a menos que se indique lo contrario. El pH del suelo se incrementa con la dilución, por eso debe especificarse la relación suelo:agua utilizada en su determinación, sin embargo en ninguna de las publicaciones citadas en la Tabla II.2 se menciona. El SSDS (1993, página 296) hace referencia al método del Soil Survey Laboratory Staff (1992) en el que el pH en agua lo miden en relación 1:1 y puede corresponder con el pH de la Tabla II.2. Por su parte Porta *et al.* (2003) dicen que los valores de pH en agua 1:2.5 se hallan en el intervalo 4.5 – 10 (página 252), y por su coincidencia con la Tabla II.2 es posible que la relación sea 1:2.5.

Para indagar la relación del pH y la CE con las sales solubles, yeso, y  $\text{CaCO}_3$  se emplearon datos de 72 muestras de suelo colectadas en la segunda y tercera campaña. Así 53 muestras se tomaron en la segunda campaña realizada del 10 al 12 y del 23 al 24 de febrero del 2000 y corresponden a los perfiles de suelos descritos en el tercer capítulo. Las 19 muestras restantes fueron tomadas en una tercera campaña realizada el 24 de agosto del 2000 para conocer la fertilidad del suelo. A 16 de las 72 muestras también se les analizó los iones solubles entre ellos el  $\text{Cl}^-$ . Con los datos de estas 72 muestras se discute en forma general la relación del pH en agua 1:2.5 y de la CEes  $\text{dS/m}$  a  $25^\circ\text{C}$  con los iones solubles en extracto de saturación (Ca, Mg, Na y K), así como con el porcentaje de  $\text{CaCO}_3$  equivalente, porcentaje de yeso, y con la razón yeso/carbonato.

Los sitios de verificación cartográfica se ubicaron en los mapas topográficos, en el mapa de área yesosa probable, y en las fotografías aéreas. De acuerdo a los datos de campo y de laboratorio y mediante una nueva fotointerpretación y análisis visual se corrigieron los linderos de presencia de yeso donde fue necesario; obteniéndose el mapa definitivo o de área yesosa final, delineando dos unidades cartográficas de acuerdo a la profundidad del horizonte yesoso.

Tabla II.2. Interpretación de los intervalos de pH en agua y de CE<sub>es</sub> dS/m a 25 °C.

pH	Interpretación (Soil Survey Division Staff, 1993)	pH	Interpretación (Porta <i>et al.</i> , 2003)
< 3.5	Ultra ácido	<4.5	Extremadamente ácido
3.5-4.4	Extremadamente ácido	4.5-5.0	Muy fuertemente ácido
4.5-5.0	Muy fuertemente ácido	5.1-5.5	Fuertemente ácido
5.1-5.5	Fuertemente ácido	5.6-6.0	Moderadamente ácido
5.6-6.0	Moderadamente ácido	6.1-6.5	Levemente ácido
6.1-6.5	Levemente ácido	6.6-7.3	Neutro
6.6-7.3	Neutro	7.4-7.8	Medianamente básico
7.4-7.8	Levemente alcalino	7.9-8.4	Básico
7.9-8.4	Moderadamente alcalino	8.5-8.9	Ligeramente alcalino
8.5-8.9	Fuertemente alcalino	9.1-10	Alcalino
>9	Muy fuertemente alcalino	> 10	Fuertemente alcalino

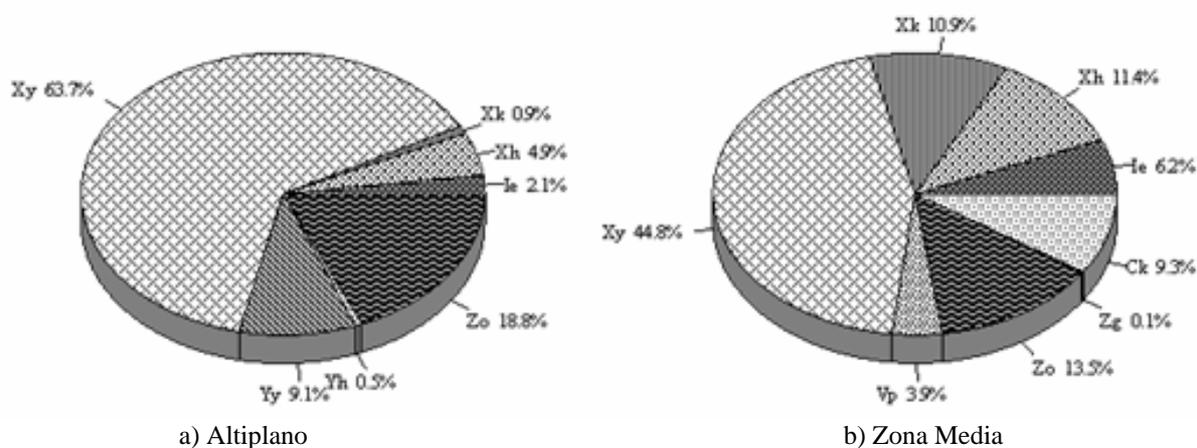
CE <sub>es</sub>	Interpretación (Soil Survey Division Staff, 1993)
0-2	No salino
2-4	Muy levemente salino
4-8	Levemente salino
8-16	Moderadamente salino
≥ 16	Fuertemente salino

**4.2.3.3. Restitución fotogramétrica y digitización.** Para la *restitución fotogramétrica* se usó un transferiscopio Zeiss de la Facultad de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, utilizándose como mapa base la carta topográfica 1:50 000 de CETENAL. El emplear la misma escala fotografía-mapa facilitó la restitución; además, como ambos son de la misma fecha existe concordancia entre ellos, por ejemplo en las vías de comunicación. Las delineaciones en los espaciomapas, en las áreas sin fotografías aéreas, se transfirieron a pulso tomando como referencia el relieve, vías de comunicación, poblados, sitios de verificación y otros puntos de referencia. Los mapas se *digitizaron* con el programa CartaLinx v.2 de IDRISI. La edición, la impresión y la obtención de las superficies se hizo con el software ARCVIEW v 3.2.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**5.1. Mapas generados.** Se han obtenido tres mapas, tanto para el Altiplano como para la Zona Media. El primero es el de la superficie yesosa (Mapas II.1 y II.2 del Anexo II.2) según CETENAL (1971, 1972, 1973 y 1975). El segundo representa el área yesosa probable (Mapa II.3 del Anexo II.2). El tercero es el área yesosa actualizada (Mapas II.4 y II.5 del Anexo II.2).

En la Figura II.8 se presenta la superficie de los suelos yesosos (Mapas II.1 y II.2) reportados por CETENAL (1971, 1972, 1973 y 1975). Tanto en la Zona Media como en el Altiplano predominan el Xerosol gypsico, Solonchak órtico, Xerosol háplico y el Xerosol cálcico. Los tres últimos presentan fase petrogípsica o petrogípsica profunda. La diferencia entre las dos regiones es que en la Zona Media existe Vertisol pélico y Castañozem cálcico, ambos suelos ausentes en el Altiplano. Al Yermosol gípsico solamente lo cartografiaron en la última región. Esta clase de suelo, así como la mayor proporción de los Xerosoles, es un reflejo de la mayor aridez del Altiplano (Figura II.2 y Tabla II.1).



**Ie:** Litosol éutrico, **Xy:** Xerosol gípsico, **Xh:** Xerosol háplico, **Xk:** Xerosol cálcico, **Yh:** Yermosol háplico, **Yy:** Yermosol gípsico, **Zo:** Solonchak órtico, **Zg:** Solonchak gleico, **Vp:** Vertisol pélico, **Ck:** Castañozem cálcico, Salinidad ligera, **ls**, moderada, **ms** y fuerte, **fs**, **n:** Nátrico. Las unidades de suelos sin subunidad yesosa, presentan fase petrogípsica o petrogípsica profunda.

Figura II.8 Distribución de los suelos yesosos (Xy, Yy, incluyendo los que presentan fase petrogípsica o petrogípsica profunda) reportados por CETENAL (1971, 1972, 1973 y 1975) a escala 1:50 000.

La superficie de suelos yesosos encontrada en el presente estudio duplica la reportada por CETENAL para ambas regiones. Se delimitó una área yesosa total de 397 259 ha, en cambio CETENAL solamente cartografía 193 907 ha, equivalente al 48.8 % de la delimitada en el actual trabajo. Por región, la superficie yesosa de CETENAL representa el 47.5 % de la tierra yesosa de la Zona Media y el 50.2 % de la del Altiplano (Mapas II.4 y II.5 y Tabla II.3).

Tabla II.3. Superficie yesosa reportada por CETENAL y el área yesosa final encontrada en el presente estudio.

Región	CETENAL ha	Área yesosa final, ha		
		Yeso profundo	Yeso somero	Total
Zona Media	96 844	15 287	188 663	203 950
Altiplano	97 063	59 856	133 453	193 309
<b>Total</b>	193 907	75 143	322 116	397 259

En algunas áreas CETENAL cartografía yeso donde no existe o es muy escaso, por ejemplo el área con travertino en los alrededores de Rioverde y de Progreso, Zona Media. Estas áreas se confunden con los yesos debido a que presentan patrón de fotointerpretación muy similar al de las áreas yesosas, solamente con trabajo de campo y/o determinación cualitativa de yeso se constató la presencia o ausencia del mismo. Dicha confusión se explica en parte, por el afloramiento de yeso en pequeñas áreas, a veces de metros cuadrados, en las zonas con travertino; asimismo por presentar áreas con escasa vegetación.

CETENAL incluye como superficie yesosa a algunas áreas con lutita, por ejemplo en las cercanías del poblado Rancho Nuevo, Matehuala, región del Altiplano. A pesar de ello, la cartografía de CETENAL fue muy importante en la delimitación de los terrenos yesosos, ya que nos permitió conocer y familiarizar con este tipo de suelo. También son muy útiles como área de partida para indagar posibles áreas yesosas, ahorrándonos tiempo, recursos y trabajo de campo y laboratorio. Sin esta información no se hubiera llegado a estos resultados en el mismo tiempo.

En la misma Tabla II.3 se aprecia el predominio de las áreas con yeso somero, constituyendo un 92.5 % en la Zona Media y un 69 % en el Altiplano. La superficie yesosa reportada no es definitiva, ya que existen referencias verbales de la existencia de materiales yesosos en otras partes del estado, por ejemplo en el municipio de Charcas (Pablo Pineda Mares, comunicación

personal) perteneciente al Altiplano, o las 90 ha en que aflora yeso en la “Barranca del yeso”, Guadalcázar, mencionadas por Martín del Campo (1959), o el área en la cercanía de El Coyote, Villa Hidalgo, donde Soria (2004) describe un perfil yesoso pero sin mencionar la extensión.

La superficie yesosa final es menor a la inicial representada en el Mapa II.3 (Anexo II.2) debido a que áreas con horizonte petrocálcico expuesto por la erosión, áreas con travertino o con lutita superficiales, áreas con sello o costra y área con baja cubierta vegetal, presentaron patrones de interpretación similares tanto en las fotografías aéreas como en los espaciomapas (color, tono, textura, etc.), confundándose con las áreas yesosas. Por otro lado, en el Mapa 3 se incluyeron zonas yesosas que no están dentro del estado de San Luis Potosí, por ejemplo al oeste de El Salado se incluyó parte de Nuevo León y al norte de la Zona Media a parte de Tamaulipas, dichas áreas se dejaron fuera del área de estudio. Además, casi toda la superficie de la unidad cartográfica “área yesosa menos probable” del Mapa II.3, denominada así por tener menor posibilidad de contener yeso (punto 4.2.1 inciso ii), no resultó yesosa. Por ejemplo, en la cercanía y norte del poblado El Carmen, Villa de Guadalupe, en el Altiplano.

Con los criterios de evaluación de la calidad de un mapa de suelo, y teniendo en cuenta que el presente solamente es de áreas yesosas, mencionados por Porta *et al.* (2003), los Mapas II.4 y II.5 (Anexo II.2) del área yesosa actualizada, se pueden considerar a nivel de reconocimiento. De acuerdo al material utilizado, así como al trabajo de campo y de laboratorio realizado, se encuentran en los límites con los estudios semidetallados; ya que se realiza el inventario de un recurso, indicando su localización. Aunado a lo anterior, se tratan aspectos de viabilidad, en general como uso agrícola o ganadero. El grado de actuación de acuerdo al objetivo y al hacer uso de teledetección y de información de campo, se corresponde con el nivel de estudio.

Para poder emplear la cartografía obtenida con fines ejecutivos, es decir para proyectos concretos en finca productiva o experimental, es necesario más trabajo de laboratorio y de campo. Por las razones anteriores y considerando la densidad de observaciones necesarias (Porta *et al.*, 1999), los mapas resultantes se pueden considerar de escala 1:175000, con una tolerancia de la ubicación de los límites de 100 a 200 metros. En términos generales, a mayor escala se tienen unidades cartográficas más homogéneas, y a mayor homogeneidad mayor utilidad de una cartografía. Por ello es necesaria una cartografía más detallada para estudios específicos y fines prácticos.

**5.2. El pH y la CE.** En este punto se analizan los valores de i)  $pH_{1:5}$  y  $CE_{1:5}$  en los sitios de verificación cartográfica (Tablas II.4 y II.5), ii) la relación entre el  $pH_{1:5}$  y la  $CE_{1:5}$  en los sitios de verificación cartográfica, y iii) la relación del  $pH_{1:5}$  y  $CE_{1:5}$  con las sales solubles, carbonatos y yeso, con datos de la segunda y tercera campaña.

Tabla II.4. Valores de pH y CE dS/m a 25 °C, ambos en relación suelo:agua 1:5, medidos en los sitios de verificación cartográfica en el Altiplano potosino.

Sitio	H	pH	CE	Sitio	H	pH	CE
Entronque a San Francisco – 1	Hs	8.92	1.20	Madriguera, La Trueba I	Hsb	7.73	1.99
“	Hsb	8.89	1.70	Madriguera. La Trueba II	Hsb	7.58	2.09
Km 103, SLP – Matehuala	Hsb	9.42	0.29	La Trueba	Hsb	8.00	0.56
Km 116.5 SLP–Matehuala	Hs	9.44	0.20	Salado – 1	Hsb	8.16	2.93
“	Hsb	9.42	0.45	Vanegas, rumbo a Wadley	Hsb	7.67	2.95
Charco Blanco 1, Guadalcázar	Hsb	9.09	1.10	El Manantial	Hsb	7.68	1.37
San Rafael	Hs	7.7	2.10	San Juan	Hsb	7.93	1.58
Salitrillos - 1	Hs	8.1	1.80	(3) Encarnación de Abajo	Hsb	7.71	0.16
Salitrillos – 3	Hs	7.4	1.50	(4) Rancho Cinco Señores	Hsb	8.19	0.10
Rinconada – 1	Hs	7.9	1.90	(6) Rancho Cinco Señores	Hsb	7.91	1.17
La Cruz - 3	Hs	8.2	0.20	(8) Santa Cruz	Hsb	8.14	3.21
El Saladito	Hs	8.1	2.90	(9) Santa Cruz	Hsb	8.07	0.27
Km 3.5 – 1	Hs	8.2	1.80	(10) Vanegas	Hsb	7.04	0.89
El Salado - 2	Hsb	7.39	2.45	(11) Sabanilla	Hsb	8.06	0.86
El Salado - 3	Hsb	8.05	3.16	(15) San Cristóbal –1	Hsb	8.21	1.94
San Vicente -1	Hs	7.71	1.10	(16) San Cristóbal-2	Hsb	7.88	1.77
San Vicente - 2	Hsb	8.03	0.31	(17) San Cristóbal-3	Hsb	7.64	2.24
La Hacienda - 1	Hsb	8.06	0.25	(18) San Cristóbal-4	Hsb	8.18	0.13
La Hacienda - 2	Hsb	7.84	0.33	(20) Estación Catorce	Hsb	8.33	0.07
El Salado-San Vicente 1	Hs	8.30	3.20	(21) Estación Wadley	Hsb	7.85	1.75
“	Hsb	7.68	2.52	(22) R de Coronados-1	Hsb	8.15	0.178
El Salado-San Vicente 2	Hs	8.20	15.91	(23) R de Coronados-2	Hsb	7.70	1.892
“	Hsb	7.76	2.98	(24) R de Coronados	Hsb	8.20	0.25
(2) CBTA 52	Hs	8.10	0.20	(25) Jara Brava	Hsb	7.60	0.47
(26) La Maroma-1	Hsb	8.05	0.41	(53) Charco Cercado	Hsb	7.95	0.31
(27) Est. La Maroma-2	Hsb	8.64	0.09	(55) Km 113 Huizache-Matehuala	Hsb	8.32	0.26
(29) Trueba-1	Hsb	8.25	2.30	(56) Noria el Conde	Hsb	7.60	1.33
(30) Trueba-2	Hsb	8.60	3.05	(59) San Francisco, Guadalcázar	Hsb	8.16	0.34
(33) Las Pinta-2	Hsb	7.95	0.35	(66) La Masita-2	Hsb	7.78	1.71
(34) La Pinta-3	Hsb	8.10	0.15	(67) La Masita-Palo Blanco	Hsb	7.67	2.39
(41) San Isidro	Hsb	7.96	0.59	(68) San Miguel-1	Hsb	7.91	0.45
(45) San Isidro	Hsb	8.71	0.14	(73) Santa Rosa-4	Hsb	7.78	1.88
(52) Charco Cercado	Hsb	8.07	0.31	(74) Pozas de Santa Ana	Hsb	7.68	3.73

Nota: H = Horizonte, Hs = Horizonte superficial, Hsb = Horizonte subsuperficial.

Tabla II.5. Valores de pH y CE dS/m a 25 °C, ambos en relación suelo:agua 1:5, medidos en los sitios de verificación cartográfica en la Zona Media.

Sitio	H	pH	CE	Sitio	H	pH	CE
Las Magdalenas	Hsb	8.86	0.46	Tierra negra, Benito Juárez	Hsb	9.12	1.93
Bordo Blanco –1	Hsb	7.60	2.50	Piedras Negras	Hsb	8.71	2.20
Bordo Blanco –2	Hsb	9.00	2.27	Entre Pastora y Progreso.	Hs	8.98	1.97
Basurero municipal, Rioverde.	Hsb	9.20	0.32	“	Hsb	9.83	3.90
Tierras Blancas, Río Verde	Hsb	8.10	2.80	Adelante de Benito Juárez	Hs	8.90	1.00
Potrero Las Mulas, Río Verde.	Hsb	8.20	3.40	“	Hsb	9.72	2.54
Basurero El Jabalí, Río Verde	Hsb	9.06	1.04	Área con cedro, I, B. Juárez	Hs	9.56	15.90
Entre acequia Villanos y El Brazo	Hsb	9.35	5.81	“	Hsb	9.21	3.22
Canal Lateral 2 Presidio, Río Verde	Hsb	8.98	2.82	Tierra negra, B. Juárez	Hsb	9.28	0.90
El Refugio	Hsb	8.95	1.30	De regreso a B. Juárez	Hs	8.85	2.70
Puente Verastegui, Río Verde.	Hs	8.89	1.80	Cedro II	Hsb	9.25	6.30
“	Hsb	9.05	1.96	Parcela de Polo Castillo, Progreso	Hsb	8.10	3.00
Las Águilas, por la gasera.	Hs	9.25	0.24	El Bañito, Progreso	Hsb	8.00	6.00
Cd. Fernández.	Hsb	8.84	1.80	Loma Santa Rosa , Progreso	Hsb	9.02	0.43
Miguel Hidalgo	Hsb	9.48	10.30	Santa Rosa, Progreso	Hsb	8.87	2.00
Redención Nacional.	Hs	8.66	2.55	San Bartolo I	Hs	8.73	2.02
“	Hsb	9.17	0.30	“	Hsb	9.27	2.15
La Redención Nacional.	Hsb	8.30	2.10	San Bartolo II	Hs	8.96	3.10
Ciudad Fernández	Hsb	9.04	0.50	“	Hsb	9.43	5.80
Puertas Cuatas, Ciudad Fernández	Hs	8.84	1.08	San Bartolo II'	Hsb	8.96	3.10
“	Hsb	8.87	1.60	San Bartolo III	Hsb	8.96	0.65
SPLASH, Ciudad Fernández	Hs	8.93	2.20	San Bartolo IV	Hsb	9.21	0.20
“	Hsb	8.93	2.09	San Bartolo V	Hs	8.91	1.00
La Concepción, Cd. Fernández	Hsb	8.10	2.85	“	Hsb	8.76	1.60
La Concepción, Cd. Fdez, agostadero	Hs	9.18	1.91	La Borreguita	Hsb	8.95	1.60
	Hsb	9.08	0.40	Entronque La Borreguita	Hsb	9.40	0.36
Ejido Benito Juárez, Rioverde	Hs	9.00	0.70	Entronque San Isidro 1	Hsb	9.62	10.90
Km 49.7, Huizache-Cd. del Maíz	Hs	8.70	0.90	Las Negritas 1	Hsb	9.11	0.40
“	Hsb	8.90	4.10	Las Negritas 2	Hsb	6.68	7.60
Hincada I	Hs	9.40	0.40	Km 43.3, Huizache-Cd. del Maíz	Hsb	8.75	3.60
“	Hsb	8.96	15.10	Huizache–Cd. Maíz. Km 65.0	Hsb	9.27	4.10
Hincada II-2	Hsb	8.70	1.60	Huizache–Cd. Maíz. Km 50	Hsb	9.39	4.30
Km 61 – 2, Huizache-Cd. del Maíz	Hsb	8.78	2.10	Cerrito Blanco-2, Cd. del Maíz	Hsb	9.30	3.30
El Custodio	Hs	9.20	0.24	La Gavia	Hsb	9.30	3.30
“	Hsb	8.80	1.70	Pastora	Hsb	9.02	1.40
El Ratón	Hsb	8.97	2.06	Angostura	Hsb	9.47	0.17
Km 43.3, Huizache-Cd. del Maíz	Hsb	8.75	3.60	Panteón, Progreso	Hsb	7.95	0.97
Km 85.5 – 1, Huizache-Cd. del Maíz	Hsb	8.02	0.20	El Tepozán	Hsb	8.13	0.25

Nota: H = Horizonte, Hs = Horizonte superficial, Hsb = Horizonte subsuperficial.

Continuación de la Tabla II.5

Sitio	H	pH	CE	Sitio	H	pH	CE
Km 85.5 – 2, Huizache-Cd. del Maíz	Hsb	9.09	2.10	Palo Seco II – 1	Hsb	9.38	0.23
Charco Blanco 1, Cd. del Maíz	Hsb	8.70	1.10	Km 2 Palo Seco - Cerritos	Hsb	7.76	0.55
El Hepazote	Hsb	8.77	0.70	11.2 Km, Palo Seco	Hsb	8.45	0.21
Encarnación 2	Hsb	9.54	0.80	La Cardona	Hsb	7.64	2.55
San Mateo 2	Hsb	9.12	1.95	San Gabriel – 2	Hsb	7.76	2.16
Cerro San Juan I – 2	Hsb	9.28	0.90	Panteón-Progreso I	Hsb	7.65	2.98
Gasolinera de Villa Juárez	Hsb	9.16	1.80	Panteón Progreso II	Hsb	8.00	1.72
Juan Moreno Mtz.	Hsb	8.90	2.10	Santo Domingo I	Hsb	8.10	4.03
San Isidro	Hsb	8.82	2.00	Santo Domingo II	Hsb	8.18	9.44
Palo Seco	Hsb	10.17	0.20	El Baño, Progreso	Hsb	8.04	12.50
San Mateo – 2	Hsb	8.84	1.70	12, Santa Rita	Hsb	7.84	1.49
Santo Domingo – 2	Hsb	9.21	2.10	13, San Francisco	Hsb	7.67	3.22
San Bartolo – Tablas –1	Hsb	9.33	4.30	14, San Francisco	Hsb	7.92	4.17
San Bartolo – Tablas –4	Hsb	9.06	4.30	15, San francisco	Hsb	7.35	2.12
Km 4.8	Hsb	8.97	2.80	17, El Sabinillo	Hsb	7.75	2.24
Tejocote	Hsb	8.95	2.10	18, La Morita	Hsb	7.64	2.53
Granjenal – 1	Hsb	8.91	5.50	19, La Morita	Hsb	7.77	4.27
Granjenal – 2	Hsb	9.48	0.39	20, La Morita	Hsb	7.66	0.75
David	Hsb	8.48	1.80	22, La Libertad	Hsb	7.95	1.40
Sorgo normal, Villa Juárez	Hsb	9.44	0.33	23, Palomas	Hsb	7.81	2.09
Sorgo clorótico, Villa Juárez	Hsb	9.33	0.25	24, Monte Bello	Hsb	8.04	0.29
3, Canal viejo en supercarretera	Hsb	8.05	2.30	25, Oasis	Hsb	7.75	0.99
4, Supercarretera	Hsb	8.03	3.26	26, Oasis	Hsb	7.92	0.43
10, La Laborcilla	Hsb	8.35	0.13	27, Palomas	Hsb	8.03	0.36
8, Área de práctica Los jaguares	Hsb	8.14	0.42	29, Palomas	Hsb	7.73	1.76
9, Miguel Hidalgo	Hsb	8.13	0.26	30, Palomas	Hsb	7.69	1.22
Manzanillas	Hsb	7.99	0.41	32, Agua Nueva del Norte	Hsb	7.65	1.79
Palo Seco	Hsb	7.75	0.73	34, La Hincada	Hsb	7.45	1.19

Nota: H = Horizonte, Hs = Horizonte superficial, Hsb = Horizonte subsuperficial.

### 5.2.1. Interpretación de los valores del $pH_{1:5}$ y de la $CE_{1:5}$ en los sitios de verificación cartográfica.

**5.2.1.1.  $pH_{1:5}$ .** El valor de pH del suelo se ve afectado (entre otros factores) por la relación suelo:solución a la que se mida, aumentando con la dilución. Así el incremento desde el punto pastoso o pasta saturada hasta una relación suelo:agua de 1:10 usualmente es del orden de 0.2 a 0.5 unidades de pH (Jackson, 1964), o para Peech (1965) puede ser de hasta una unidad de pH en una relación 1:5. Para Herrero (1982) el pH en agua 1:2.5 es de una a cinco décimas de unidad de pH más elevado que en pasta saturada. En suelos con yeso visible a simple vista Van Hoesen (2000) encuentra incrementos del pH inconsistentes en dilución 1:2 de 0.05 a

0.74 y para 1:5 de 0.13 a 1.35 respecto al determinado en una dilución 1:1, con la última se tiene el pH más exacto y representa al pH del suelo, aunque no menciona si utilizó agua, CaCl<sub>2</sub> o algún otro líquido en las diluciones.

En los sitios de verificación cartográfica el pH se determinó en una relación suelo:agua de 1:5, y para indagar si con dicha relación se podría estar sobrevalorando el pH frente a su determinación en una dilución menor, a 30 muestras de suelo se les determinó el pH en relación suelo:agua 1:1, 1:2.5, 1:5 y 1:10 (Tabla II.6). Comparando los resultados de las últimas tres diluciones con la menor (1:1) se tiene que la variación de la reacción del suelo fue de 0.0 a 0.3 para 1:2.5 y 1:5 y de 0.0 a 0.5 con la dilución de 10, solamente en un sitio y en las tres diluciones se tuvo un valor menor; el promedio fue de 0.10, 0.11 y 0.15 respectivamente; y la R<sup>2</sup> fue de 0.94, 0.85 y 0.87 para la dilución 2.5, 5 y 10, respectivamente. Así los valores de pH de las Tablas II.4 y II.5 pueden estar sobrevalorados respecto a una relación 1:1 hasta en 0.3 unidades de pH, o de 0.2 respecto a 1:2.5, lo cual se debe tener en cuenta en la interpretación.

En los sitios de verificación cartográfica para el Altiplano y de acuerdo a Soil Survey Division Staff (1993), el pH varía de leve a moderadamente alcalino con valores aislados con mayor alcalinidad. En la Zona Media se presentan dos intervalos de pH, el primero va de leve a moderadamente alcalino, y el segundo de fuertemente alcalino a muy fuertemente alcalino (Figuras II.9).

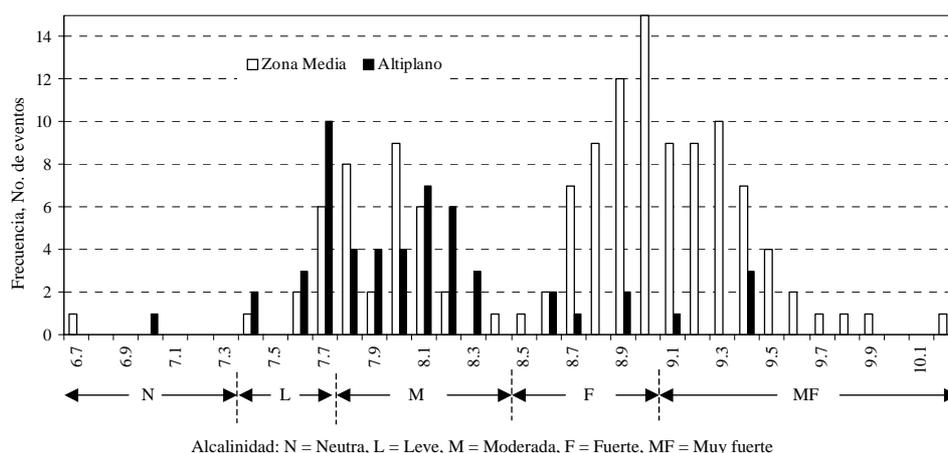


Figura II.9. Distribución de frecuencias de los valores de pH del horizonte subsuperficial en los sitios de verificación cartográfica.

La variación del pH con la salinidad depende del tipo de sales presentes. Por ejemplo, el incremento de sales neutras (NaCl, nitratos, CaSO<sub>4</sub>) ocasiona decremento en el pH; así en la época seca y calurosa se tiene pH bajo debido a la acumulación de estas sales, en cambio en la época de lluvias y fresca el pH se incrementa al lixiviarse las sales (Peech, 1965). Para Boyadgiev y Verheye (1996) se puede asumir un decremento en la reacción del suelo con la acumulación de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O en suelos con relación yeso/carbonato mayor a 1; mientras que en suelos con contenido de yeso menor al carbonato la reacción del suelo parece ser amortiguada por éste último a un pH alrededor de 8.2 (Harden *et al.*, 1991).

Tabla II.6. pH determinado a varias relaciones suelo:agua.

Sitio	pH			
	1:1	1:2.5	1:5	1:10
Panteón, Negra	7.8	7.8	7.9	7.9
Panteón, Blanca	7.9	8.0	8.0	8.0
Cero	7.9	8	7.9	7.9
San Isidro I, NSA	7.7	7.8	8.0	7.9
San Isidro	7.7	7.9	8.0	8.1
P. El Carmen-I	7.8	7.9	7.8	7.8
P. El Carmen, Blanca	7.9	8	8.0	8.0
La Concepción, Negra 1	7.7	7.8	7.7	7.9
La Concepción, Negra 2	7.8	7.8	7.8	7.9
Santa Rosa, Blanca	8.0	8	8.1	8.0
PEC_2	7.6	7.9	8.0	8.1
PEC_7	7.9	8	8.0	8.2
P1_1	7.7	7.8	7.8	7.9
P1_2	8.0	7.9	7.8	7.9
P2_2	8.8	8.9	8.8	8.8
P3_1	7.5	7.5	7.5	7.7
P3_2	7.5	7.8	7.8	7.8
SB_3	7.8	7.9	8.1	8.0
SB_4	7.9	8.1	8.0	8.0
SB_I	7.9	7.9	7.9	8.0
SB_II	7.7	7.8	7.9	8.0
P4	7.5	7.7	7.7	7.6
P6_1	8.7	8.7	8.7	8.9
P6_2	8.5	8.6	8.5	8.5
P6_3	8.4	8.6	8.6	8.6
P8_Costra	8.5	8.7	8.8	8.8
P12_1	7.9	7.9	7.8	7.9
P15_1	7.9	7.9	8.0	8.0
P15_69-73 cm	7.8	7.9	8.1	8.0
P8_1	8.7	8.8	8.7	8.8
Mediana	7.8	7.8	7.9	7.9
Promedio	7.95	8.04	8.06	8.10

El comportamiento del pH antes señalado, se cumple bajo ciertas condiciones, tales como pH menor a 8.5, presencia de sales neutras y predominio del Ca sobre el Na en los sitios de intercambio. Sin embargo, cuando prevalece el Na sobre el Ca las características de la solución del suelo son otras, por ejemplo el pH supera el valor de 8.5. Para Porta *et al.* (2003) cuando el sodio (como bicarbonato o sulfato) forma parte de las eflorescencias se presentan condiciones alcalinas, y a mayor cantidad de sodio mayor alcalinidad.

Según Harden *et al.* (1991) el pH superior a 8.2 sugiere la presencia de carbonato de sodio, y cuando el pH es mayor a 8.5 invariablemente el sodio es el catión dominante en los sitios de intercambio, ya que el calcio precipita como carbonato (Cresser, *et al.*, 1993; Pal *et al.*, 2003) disminuyendo su concentración (Figura II.11). Para Richards (1974)  $pH_{es}$  de 8.5 o mayor casi siempre indica un PSI de 15 o mayor y la presencia de carbonatos de metales alcalino-térreos. De esta forma se pueden presentar cambios en el pH con la variación de la concentración de sodio en la solución del suelo, por ejemplo Qadir *et al.* (1996) reportan decremento significativo del pH en la parte superior de una columna de suelo salino-sódico comparado con el pH de la parte más baja, atribuyéndoselo a la remoción del sodio de la primera capa.

Los suelos de la Zona Media se muestrearon tanto en la época seca como en la lluviosa. Ello con los razonamientos y fundamentos de los párrafos anteriores, podría explicar la distribución bimodal del pH y de la CE. El intervalo de valores de pH más altos correspondería a la época seca (Figura II.10), ya que se muestreó principalmente entre los meses de abril a junio cuando aún no se establecían las lluvias, incluso para julio en muchos sitios todavía no llovía. Precipitación escasa y alta temperatura provocan elevada evaporación (Figura II.2), ocasionando el ascenso de las sales y su acumulación en la superficie.

El comportamiento bimodal de la reacción del suelo indica que en cuestión de pH existen dos condiciones mejor definidas en la Zona Media, la primera ( $pH \leq 8.4$ ) corresponde a áreas o época del año con poca o sin problemas de alcalinidad (Soil Survey División Staff, 1993) o de basicidad para Porta *et al.* (2003), y la segunda con problemas de alcalinidad (Figura II.9). Como señalan estos autores, en un suelo básico o con alcalinidad leve a moderada se tiene disminución de la disponibilidad de P y B, y deficiencia creciente de Co, Cu, Fe, Mn y Zn. En suelos con alcalinidad fuerte se puede presentar toxicidad por Na o B; deficiencias de micronutrientes; escasa actividad microbiana; y deterioro de las propiedades físicas como dispersión de arcillas, solubilización de la materia orgánica, mala estructura, baja

permeabilidad, entre otras. En síntesis se tienen malas condiciones para el desarrollo de las plantas que se reflejarán en bajos rendimientos de los cultivos e incluso en la muerte de las plantas sensibles.

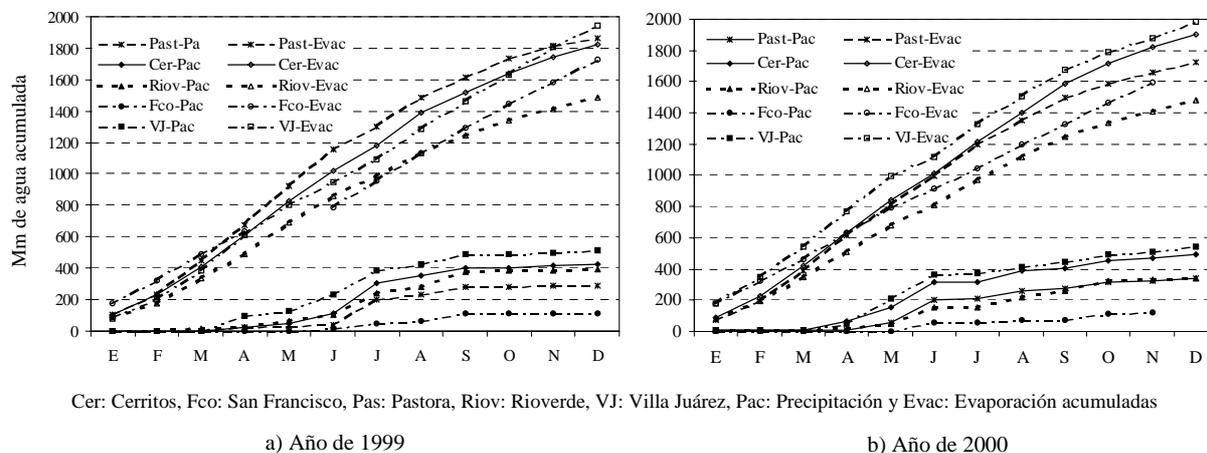


Figura II.10. Precipitación y evaporación acumuladas en los años de 1999 y 2000 para varias estaciones meteorológicas de la Zona Media (CNA, 2001).

De la Figura II.9 y de acuerdo a la literatura revisada (Richards, 1974; Harden *et al.*, 1991; Cresser *et al.*, 1993; Báez, 1999; Urbano, 2002; Porta *et al.*, 2003; Rengasamy *et al.*, 2003) en las muestras de suelo de los sitios de verificación cartográfica con  $\text{pH}_{1:5}$  mayor a 8.5, es decir en los sitios con alcalinidad fuerte a muy fuerte, se infiere el posible predominio del sodio sobre el calcio. Asimismo durante la campaña de verificación cartográfica se detectó álcali negro en áreas con problemas de sales. Dicho color es debido a la dispersión o solubilización de la materia orgánica ocasionada por el sodio (Porta *et al.*, 2003; Cresser *et al.*, 1993). Estas sales sódicas desaparecen rápidamente de la zona radicular con las primeras lluvias debido a su alta solubilidad y a que el agua de lluvia está libre de sales,  $\text{CE} < 0.5 \text{ dS/m}$  (Ayers y Westcot, 1985). Es decir la salinidad/sodicidad tiene carácter estacional, siendo más altas en la época seca debido a la alta evapotranspiración, así en la época de lluvias la concentración de sales es menor en los horizontes superficiales. La acción de lavado de sales por la lluvia se corrobora con lo reportado por Herrero (1982), quien dice que la lluvia lavó el sodio y los cloruros de los primeros 22 cm en un suelo salino de Aragón, España.

**5.2.1.2. Conductividad eléctrica.** Como se dice en el apartado 4.2.3.1 la CE en las muestras correspondientes a los sitios de verificación cartográfica se determinó en relación suelo:agua 1:5, y como la interpretación de los intervalos de conductividad eléctrica de Soil Survey Division Staff (1999; Tabla II.2) es con base a CE en extracto de saturación, a 14 muestras de suelo correspondientes a muestras de los pediones del capítulo IV, se les determinó la CE en extracto de saturación y en extracto suelo:agua en diluciones 1:1, 1:2.5, 1:5 y 1:10 (Tabla II.7), y con los datos se hicieron regresiones lineales para estimar la  $CE_{es}$ . Los resultados son satisfactorios ya que la  $R^2$  para las cuatro diluciones fue mayor a 0.93 (Tabla II.8). Poch (1992) estimar la  $CE_{es}$  con base a  $CE_{1:1}$  en 15 muestras y obtiene una  $R^2$  de 0.92.

Tabla II.7. Conductividad eléctrica\*, dS/m 25 °C, determinada en extracto de saturación y en otras diluciones suelo:agua.

$CE_{es}$	$CE_{1:1}$	$CE_{1:2.5}$	$CE_{1:5}$	$CE_{1:10}$
14.0**	2.66	3.27	3.74	3.1
13.5	5.06	5.19	5.16	4.15
25.5	8.95	9.4	8.85	5.84
17.2	6.43	6.12	6.75	4.62
2.4	1.26	1.97	2.32	2.01
23.5	9.04	9.18	8.32	5.41
2.35	0.92	1.84	2.4	2.19
2.2	0.86	1.77	2.15	2.34
20	7.03	7.65	6.79	4.73
8.44	3	4.06	4.35	3.72
24	7.15	8.8	8.86	5.52
3.02	1.17	2.01	2.69	2.53
2.22	0.86	1.87	2.48	2.38
58.8	>10	>10	>10	>10

\* La  $CE_{es}$  y  $CE_{diluciones}$  determinadas por diferente personal.

\*\* Muestra de suelo sin yeso

En la Figura II.11 se muestra la variación de los datos de conductividad eléctrica en cada dilución. Solamente en el intervalo de conductividad eléctrica menores a 2.25 en las diluciones y 2.8 para la  $CE_{es}$  son semejantes, ello se podría deber a que la conductividad eléctrica está dominada por el alto contenido de yeso (12.5 a 72.3 %), aunado a un posible

bajo contenido de sales solubles. En las muestras salinas el contenido de yeso va de 2.4 a 36.5 %.

Tabla II.8. Regresiones lineales simples entre la conductividad eléctrica en extracto de saturación (CEes) y las conductividades en extractos suelo:agua a otras diluciones (1:1, 1:2.5, 1:5, y 1:10); desviaciones típicas del interceptor (*a*) y de la pendiente (*b*), y coeficiente de determinación ( $R^2$ ).

Variable independiente	a	Desv. típica	b	Desv. típica	$R^2$ , %
CE <sub>1:1</sub>	0.47	1.11	2.80	0.21	93.9
CE <sub>1:2.5</sub>	- 2.16	1.18	2.95	0.21	94.8
CE <sub>1:5</sub>	- 4.94	1.32	3.43	0.24	95.0
CE <sub>1:10</sub>	- 11.8	1.90	6.43	0.48	94.2

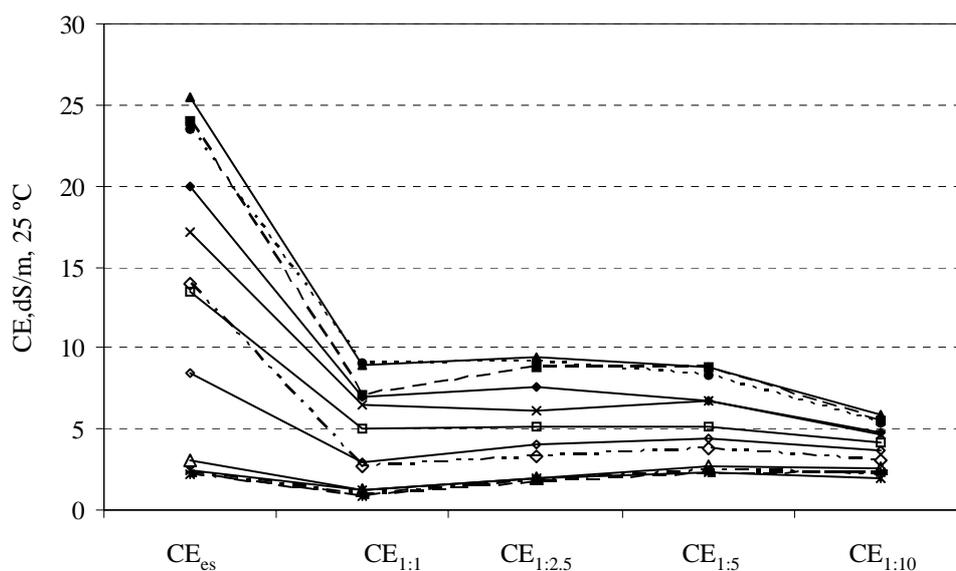


Figura II.11. Conductividad eléctrica en extracto de saturación y las conductividades en extractos suelo:agua a otras diluciones.

Con base a la conductividad eléctrica en la dilución 1:5 solamente se puede decir que a partir de 2.25 se incrementa la salinidad (Figura II.12). Cuando se interpreta la CE<sub>es</sub>, estimada con la CE<sub>1:5</sub>, según criterios de Soil Survey Division Staff (1993), en el Altiplano son pocas las muestras levemente salinas, únicamente un sitio sería fuertemente salino y los demás no serían salinos. La Zona Media es más salina, aunque la mayor parte de las muestras califican como no salinas y muy levemente salinas. Diez muestras son medianamente salinas y 9 son fuertemente salinas (Figura II.12). Con la estimación de la CE<sub>es</sub> se incrementa el número de

muestras de suelo con posibles problemas de sales, así los valores de  $CE_{1:5}$  de 4 pasan a 8.8 y los de 6 a 15.6 dS/m 25 °C. La línea roja de la Figura anterior señala el intervalo de  $CE_{es}$  menor a 4 dS/m o a 2.6 en  $CE_{1:5}$ , intervalo en el cual se considera que la salinidad tiene poca relevancia en suelos con alto contenido de yeso, ello debido a que en una solución saturada de yeso puro a 25 °C la conductividad eléctrica es de 2.2 dS/m (Porta, 1998). Al igual que con el pH, la distribución de frecuencias es bimodal aunque menos marcada. Se podría pensar que esta distribución representa ya sea a dos tipos de suelos (sin salinidad o con salinidad) o época de muestreo, tal como época seca y húmeda.

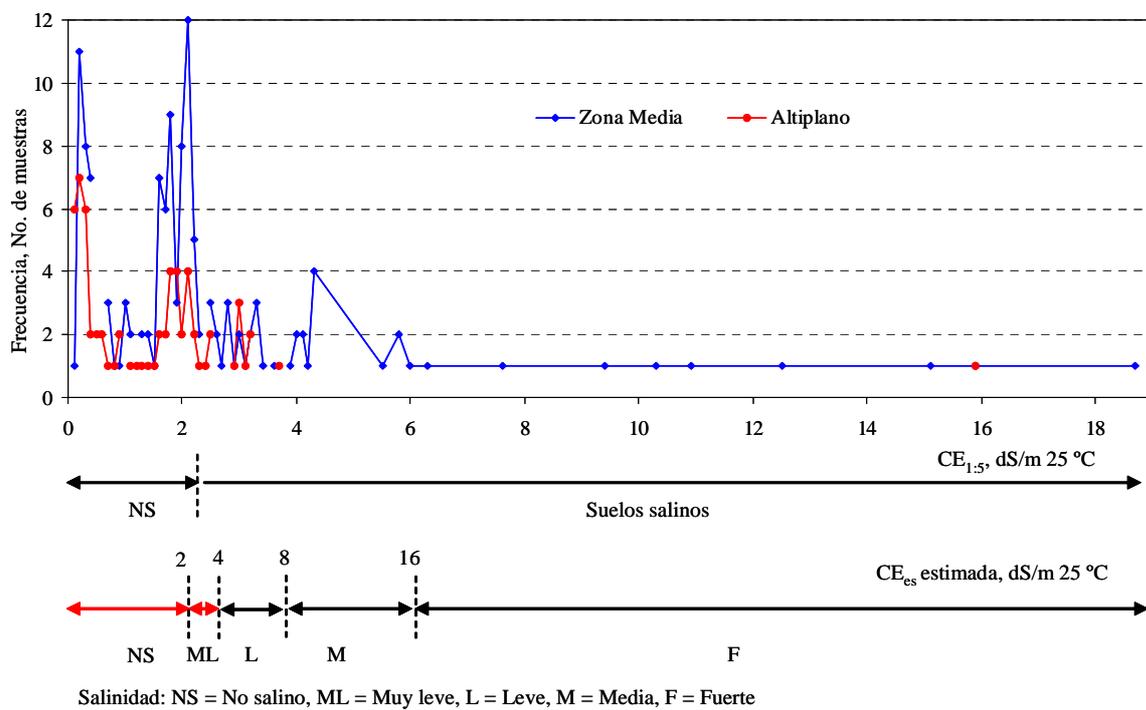


Figura II.12. Distribución de frecuencias de los valores de  $CE_{1:5}$  y  $CE_{es}$  estimada, dS/m 25 °C, e interpretación técnica del horizonte mineral en los sitios de verificación cartográfica

La Tabla II.9 muestra la superficie con problemas de sales y/o sodio considerando la fase salina y/o sódica de los suelos yesosos reportados por CETENAL (Mapas II.1 y II.2 del Anexo II.2). La salinidad reportada por CETENAL concuerdan más con la conductividad eléctrica en extracto de saturación estimada que con la  $CE_{1:5}$ , así como con lo observado en campo respecto a la ocurrencia de plantas halófilas. Alrededor de una tercera parte de las dos regiones no tiene problemas de salinidad ni de sodicidad. En general tanto en el Altiplano como en la Zona Media predomina la sodicidad sobre la salinidad. Los suelos sódicos con algún nivel de salinidad comprenden más superficie en el Altiplano, en cambio la sodicidad se

presenta en mayor extensión de la Zona Media. Debido a la importancia de las sales solubles tanto en el Altiplano como en la Zona Media es recomendable un muestreo más intenso, para así tener representada la variación de la salinidad y sodicidad de las áreas yesosas.

Tabla II.9. Superficie con problemas de sales solubles y/o de sodio de acuerdo a los Mapas 1 y 2 del Anexo (CETENAL, 1971, 1972, 1973 y 1975)\*.

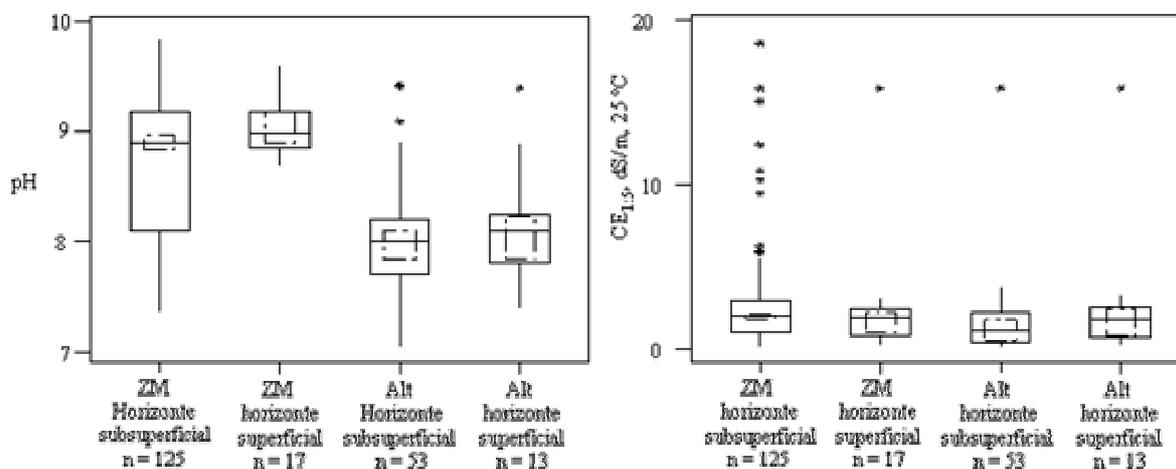
Condición del suelo	Altiplano		Zona Media		Total	
	Ha	%	Ha	%	Ha	%
Sin sales ni sodio	30 087.6	31.1	37 493.5	38.6	67 581.1	34.9
Salinidad leve, SL	1 379.1	1.4	19 586.2	20.2	20 965.3	10.8
Salinidad moderada, SM	20 749.8	21.4			20 749.8	10.7
Salinidad fuerte, SF			789.4	0.8	789.4	0.4
SL y/o Sódico	10 745.9	11.1	6 922.6	7.2	17 668.5	9.1
SM y/o Sódico	17 323.9	17.9	15 831.5	16.3	33 155.4	17.1
SF y/o Sódico	13 445.1	13.9	12 436.7	12.8	25 881.8	13.3
Sódico	3 111.4	3.2	4 003.0	4.1	7 114.4	3.7
<b>Total</b>	<b>96 842.8</b>	<b>100.0</b>	<b>97 062.9</b>	<b>100.0</b>	<b>193 906.0</b>	<b>100.0</b>

Salinidad: leve = 4 – 8, moderada = 8 – 16 y fuerte  $\geq$  16 dS/m. Sódico > 15 PSI (CETENAL)\*

Los datos de la Tabla II.9 y resultados de la verificación de campo nos dan idea de la importancia y por ende de la necesidad de conocer estos parámetros en la zona de estudio, en especial cuando se quiere establecer un nuevo regadío o mejorar el manejo del existente, ya que su conocimiento permitirá planear el manejo en forma más apropiada a las características del suelo. Además, como se explicó en el apartado 5.1, CETENAL no reporta toda la superficie yesosa, y durante el trabajo de campo se constató la importancia de las sales solubles y/o del sodio en las dos áreas de estudio. A gran parte de estas nuevas áreas yesosas CETENAL las cartografía como Solonchaks, apreciándose en ello posiblemente más importancia a la salinidad/sodicidad que a la presencia de yeso.

La Figura II.13 muestra la asimetría de los datos de  $pH_{1.5}$  hacia los valores más bajos, siendo más marcada en el horizonte mineral de la Zona Media. De acuerdo a la caja interior gran parte de los valores de  $pH_{1.5}$  se ubican ligeramente abajo de 8 en el Altiplano y cercanos a 9 en la Zona Media lo cual implica mayor alcalinidad en la segunda zona. En el Altiplano se muestran como valores atípicos a partir de  $pH_{1.5}$  de 9 debido a la baja frecuencia en este

intervalo. Ello puede significar la necesidad de muestreo más intenso de tal modo que se represente la variación del  $pH_{1:5}$ , sobre todo cuando este es mayor a 9. No se detectan valores atípicos en la Zona Media debido a que se tienen más datos distribuidos en todo el intervalo



\* Valores atípicos,  Valores entre el primer y tercer cuartil,  Intervalo de confianza de la mediana.

Figura II.13. Gráfica de caja (*boxplot*) de la  $CE_{1:5}$  y del  $pH_{1:5}$  en los sitios de verificación cartográfica por región (ZM, Zona Media; Alt, Altiplano) y por horizonte, datos de las Tablas II.4 y II.5. La caja interior indica el intervalo de confianza de la mediana al 95 %.

La  $CE_{1:5}$  en el Altiplano es ligeramente asimétrica hacia arriba en el horizonte subsuperficial y hacia abajo en el superficial, y en la Zona Media es simétrica en el horizonte mineral y en el superficial es asimétrica hacia valores bajos. El valor atípico (*outlier*) del Altiplano corresponde a un dato con 15.9 dS/m para ambos horizontes. En el horizonte subsuperficial de la Zona Media la  $CE_{1:5}$  presenta mayor variabilidad y se tienen más valores atípicos, correspondientes a los sitios con salinidad superior a 6 dS/m, es decir son pocos los sitios salinos, sódicos o salino-sódicos. Es necesario un mayor número de muestras donde se represente la salinidad en este intervalo.

La gráfica de caja no refleja la presencia de distribuciones multimodales como la que se tiene con el  $pH_{1:5}$  en la Zona Media (Figura II.13), posiblemente su principal utilidad es tener idea de la tendencia general de los datos y detectar valores atípicos. Por otro lado las mediciones del  $pH_{1:5}$  en el Altiplano y en la Zona Media son significativamente diferentes, no así la conductividad eléctrica.

**5.2.2. Relación entre el  $pH_{1:5}$  y la  $CE_{1:5}$  en los sitios de verificación cartográfica.** Al representar gráficamente el  $pH_{1:5}$  frente a la  $CE_{1:5}$  de los sitios de verificación cartográfica se aprecian tres nubes de puntos (Figura II.14), que se diferencian mejor en la Zona Media. Los grupos (Tabla II.9) que se discriminan son: I)  $pH_{1:5} < 8.5$  y  $CE_{1:5} \leq 4$ , II)  $pH_{1:5} > 8.5$  y  $CE_{1:5} \leq 4$ , y III)  $pH_{1:5}$  variable y  $CE_{1:5} > 4$ . La línea roja punteada separa las posibles muestras de suelo con predominio de yeso.

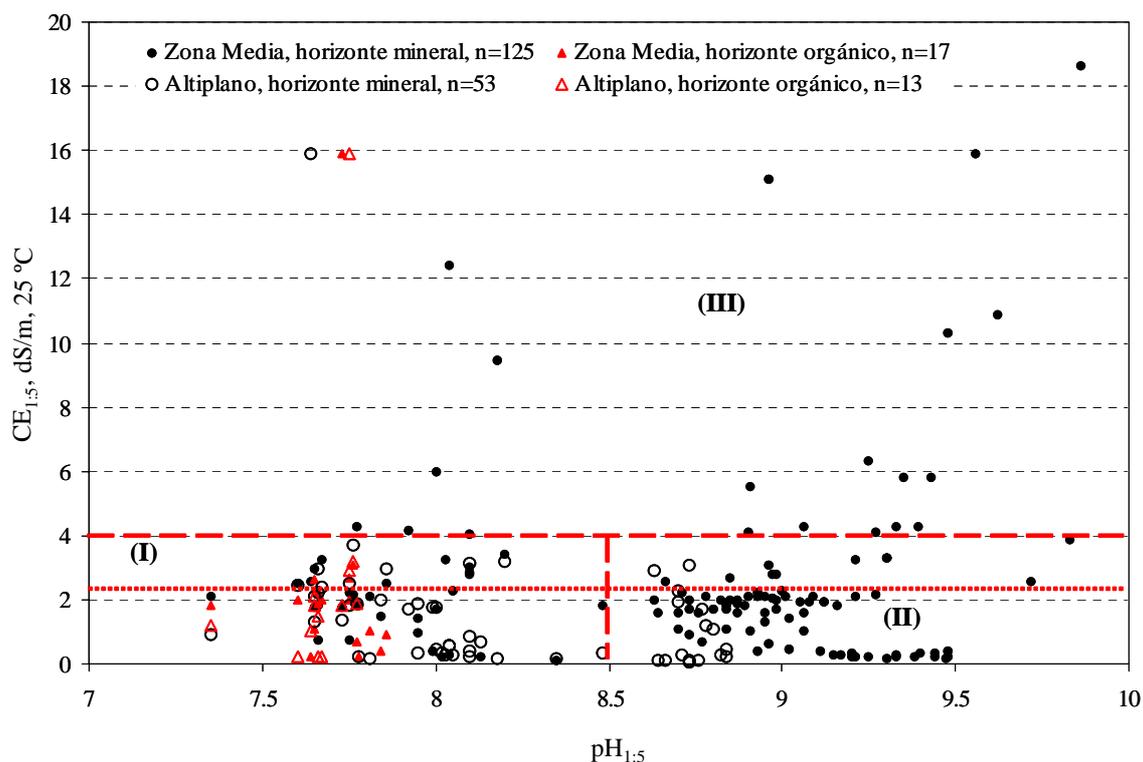


Figura II.14. Relación entre el  $pH_{1:5}$  y la conductividad eléctrica ( $CE_{1:5}$ ) en los sitios de verificación cartográfica.

El primer grupo (I) corresponde a suelos con salinidad nula a leve, lo cual se manifiesta en la mayor diversidad de especies vegetales y escasa presencia de especies halófilas. En el segundo grupo (II) la salinidad es similar a la del grupo anterior, la diferencia principal estriba en la posible (no se tienen datos de sodio) mayor presencia de sodio dado el alto valor de  $pH_{1:5}$ , sobre todo en las muestras con  $pH_{1:5}$  superior a 9.0 (Cresser *et al.*, 1993; Báez, 1999; Urbano, 2002; Porta *et al.*, 2003). La  $CE_{1:5}$  del grupo II muestran cierta alineación en torno a 2 y cercano a 1 dS/m, es posible que dichos valores representen a sitios con alto contenido de

yeso, ya que la solución saturada de yeso puro a 25 °C tiene CE<sub>es</sub> de 2.2 dS/m (Porta, 1998). También es probable que conforme incrementa el pH<sub>1:5</sub> se tenga predominio de Na<sup>+</sup>.

Los valores más altos de pH<sub>1:5</sub> y CE<sub>1:5</sub> de los sitios del grupo II, al mismo tiempo de concernir a suelos levemente salinos (moderadamente salinos según CE<sub>es</sub> estimada con base a CE<sub>1:5</sub>) o alcalinos (pH<sub>1:5</sub> > 8.5), corresponden a parte de las muestras colectadas durante la época seca. En esta la estación se acumulan las sales en los horizontes superiores debido a la fuerte evaporación. En las muestras de suelo con mayor salinidad es posible la presencia de cloro ya que con 16 pares de datos de la tercera campaña de muestro en la Zona Media, el coeficiente de determinación ajustado fue de 0.87 para la relación CE<sub>es</sub> con el Cl soluble, para suelos calcáreos del Altiplano Potosino Soria (2004) obtuvo una R<sup>2</sup> de 0.98, y Hajrasuliha *et al.* (1991) reportan una R<sup>2</sup> de 0.92 para suelos salinos del norte de Irán.

El grupo III incluye a los suelos con mayor problema de sales y de sodio en cualquier época del año, corresponde a suelos salinos, salino-sódicos y sódicos. Durante el trabajo de campo en la Zona Media, principalmente, se detectaron costras salinas y de álcali negro, la última es característica de suelos con problemas de sodio (Urbano, 2002). La salinidad de este grupo de suelos se manifiesta en la mayor cantidad de especies adaptadas a condiciones salinas, por ejemplo *Suaeda* sp, *Juniperus flaccida* Schl., *Buchloe dactyloides* (Nutt) Engelm, *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt, *Sporobolus airoides* L. y *Atriplex acanthocarpa* (Torr.) S. Watson (Tabla II.10).

En zonas áridas y semiáridas al evaporarse el agua la solución del suelo se concentra, y rápidamente se alcanza el límite de solubilidad de los sulfatos y carbonatos de calcio y magnesio precipitando; por ello predominan los iones Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> de Na<sup>+</sup>. Cuando el sodio representa más de la mitad de los cationes de intercambio empieza a ser peligroso (Urbano, 2002). Siguiendo los criterios de Porta *et al.* (2003) respecto a la predominancia del sodio en la solución del suelo cuando el pH es cercano a 9 ó mayor, los sitios del tercer grupo con pH mayor a 9.5 y baja CE<sub>1:5</sub> corresponden a suelos sódicos y unos pocos sitios a salino-sódicos.

Tabla II.10. Especies vegetales según el intervalo de pH<sub>1:5</sub> y CE<sub>1:5</sub> dS/m 25 °C. Cuadro obtenido con datos de las Tablas II.4 y II.5 y resultados del muestreo de vegetación en los sitios de verificación cartográfica.

Grupo	pH <sub>1:5</sub>	CE <sub>1:5</sub>	Plantas comunes*	
			Altiplano	Zona Media
I	< 8.5	< 4	<i>Prosopis glandulosa</i> Torr., <i>Larrea tridentata</i> (Moe. & Sessé ex DC.) Coville., <i>Bouteloua chasei</i> Sw, <i>Flaveria anomala</i> B. L. Rob., <i>Flaveria oppositifolia</i> (DC.) Rydd, <i>Muhlenbergia villiflora</i> Hitchc, <i>M. purpusii</i> Mez, <i>Yucca</i> , <i>Agave sp</i> , <i>Dasylyrion wheeleri</i> S. Watson ex Rothr, <i>Atriplex canescens</i> (Pursh) Nutt, <i>Opuntia sp</i> , <i>Jatropha dioica</i> Sessé ex Cerv., <i>Dalea filiciformis</i> Rob. & Greenm.	<i>Larrea tridentata</i> (Moe. & Sessé ex DC.) Coville., <i>Prosopis laevigata</i> (Willd.) M. C. Johnst., <i>Miranda grisea</i> Rzed, <i>Ephedra spp</i> , <i>Acacia spp</i> , <i>Suaeda sp</i> , <i>Celtis pallida</i> Torr., <i>Maytenus phyllantoides</i> Benth., <i>Jatropha dioica</i> Sessé ex Cerv., <i>Cenchrus ciliaris</i> L, <i>Buchloe dactyloides</i> (Nutt) Engelm, <i>Dalea filiciformis</i> Rob. & Greem, <i>Flaveria anomala</i> B. L. Rob., <i>F. oppositifolia</i> (DC.) Rydd, <i>Dalea filiciformis</i> Rob. & Greenm.
			<i>Prosopis glandulosa</i> Torr., <i>Opuntia leutocaulis</i> DC, <i>Muhlenbergia purpusii</i> Mez, <i>Bouteloua chasei</i> Sw, <i>Opuntia sp</i> , <i>Larrea tridentata</i> (Moe. & Sessé ex DC.) Coville., <i>Hechtia glomerata</i> Zucc., <i>Flaveria anomala</i> B. L. Rob., <i>Flaveria oppositifolia</i> (DC.) Rydd	<i>Maytenus phyllantoides</i> Benth., <i>Suaeda sp.</i> , <i>Atriplex canescens</i> (Pursh) Nutt, <i>Opuntia leutocaulis</i> DC, <i>Adelphia infestans</i> , <i>Yucca sp.</i> <i>Juniperus flaccida</i> Schl., <i>Miranda grisea</i> Rzed, <i>Cenchrus ciliaris</i> L <i>Buchloe dactyloides</i> (Nutt) Engelm, <i>Sporobolus airoides</i> L, <i>Prosopis laevigata</i> (Willd.) M. C. Johnst.
III	Variable	> 4	<i>Atriplex canescens</i> (Pursh) Nutt (un sitio cumple con esta condición)	<i>Maytenus phyllantoides</i> Benth., <i>Suaeda sp</i> , <i>Juniperus flaccida</i> Schltl., <i>Buchloe dactyloides</i> (Nutt) Engelm, <i>Atriplex canescens</i> (Pursh) Nutt, <i>Sporobolus airoides</i> L., <i>Atriplex acanthocarpa</i> (Torr.) S. Watson

\* Identificación de especies hecha por José García, herbario del Instituto de Investigación en Zonas Desérticas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México

Aunque no es la intención discutir aquí a detalle las características de las plantas que ocurren en suelos yesosos o salinos, si se considera pertinente dar unos breves comentarios sobre las especies presentes y reportadas en la Tabla II.10. Para empezar se aprecia gradiente tanto del tipo como del número de especies conforme se incrementa la salinidad y  $pH_{1:5}$ , así el número de especies gipsófilas es mayor en el grupo I y desaparecen en el grupo III, en cambio las plantas halófitas dominan a valores altos de  $pH_{1:5}$  y  $CE_{1:5}$ .

Es importante conocer las plantas que se desarrollan en un cierto hábitat debido a la estrecha relación que guardan con el sustrato, ello facilita la discriminación de ciertas condiciones del suelo. Así, se dice que las plantas son las mejores indicadores del sustrato yesoso (Cervantes *et al.*, 2001; Johnston, 1941). Lo anterior se debe a que las afloraciones de yeso soportan endemismo característico, ya sea de plantas confinadas a suelo yesoso –gipsófilas obligadas- o que lo “toleran” –gipsófilas “tolerantes”- (Johnston, 1941; Turner y Powell, 1979; Meyer, 1980; Meyer *et al.*, 1992). Las gipsófilas obligadas permiten detectar áreas yesosas con relativa facilidad, por ejemplo al norte de San Luis Potosí, México las flores amarillas de la gipsófila *Flaveria* sp. le dan aspecto amarillento a la planicie haciéndola reconocible desde kilómetros de distancia (Johnston, 1941). Lo anterior se constató durante la campaña de campo tanto en el sur de Matehuala como en la región yesosa de Ciudad del Maíz.

El grupo I (Tabla II.9) comprende tanto especies gipsófilas *Muhlenbergia villiflora*, *Bouteloua chasei*, *Dalea filiciformis*, *Flaveria anomala*, *Flaveria oppositifolia*, (Johnston, 1941; Grande 1967; Meyer 1980; Meyer *et al.*, 1992) como no gipsófilas debido a que representa a suelos yesosos con horizonte aluvial superficial de espesor variable y derivado de rocas ígneas o calcáreas, y con el incremento del espesor de éste van siendo excluidas las gipsófilas (Meyer *et al.*, 1992). En términos de las plantas gipsófilas se puede considerar desnudo o sin horizonte aluvial cuando tiene un grosor menor a 2.5 cm. (Johnston, 1941). Por ejemplo, en las cercanías de Matehuala, SLP, *Larrea tridentata* predomina en áreas con horizonte aluvial mayor a 20 cm, las suculentas y arbustivas diferentes a *Larrea* prevalecen en aluvión de 5 a 20 cm de espesor, y el pastizal gipsófilo (*Muhlenbergia* y *Bouteloua*) ocurren en áreas con costra y con material aluvial de 1 cm (Meyer *et al.*, 1992).

Por otro lado son muchas las especies características de ambientes no yesosos pero que también se desarrollan en áreas con yeso, aunque en menor cantidad. Así las especies de taxa estrechamente relacionados y que tienden a ocupar áreas yesosas pueden también ocurrir en

suelos salinos encontrándoseles junto a halófitas, denominadas “gipsófilas halófitas” (Johnston, 1941) o “gipso-halófitas” (Mommaerts-Billiet, 1971). Se requiere de estudio detallado para saber si alguna especie del grupo II (Tabla II.8) corresponde a este tipo de plantas. En dicho grupo predominan las especies no gipsófilas, sin embargo algunas son semitolerantes a la salinidad, tales como *Prosopis* sp, *Sporobolus airoides*, *Cenchrus ciliaris*, *Buchloe dactyloides*.

A las especies *Prosopis juliflora* y *Atriplex canescens* del desierto del Mojave, USA, Meyer (1980) las clasifica como “extraviadas o vagabundas” (“*waij*”) y dice que se les encuentra muy raramente en suelos yesosos, salvo individuos aislados. Sin embargo, Rzedowski (1966) en áreas yesosas o salobres con horizonte aluvial de espesor variable a veces de 1 cm (correspondientes a los grupos I y II) de la Zona Media, reporta vegetación dominada por *Prosopis juliflora* y no como individuos aislados. Sin embargo la especie identificada en campo fue *P. laevigata*, aunque no se realizó un muestreo específico para este género por lo que no se puede afirmar que no ocurra *P. juliflora* en la Zona Media o en el Altiplano. Por su parte *Atriplex canescens* ocurre principalmente en áreas yesosas levemente salinas en la Zona Media, o fuertemente salinas en ambas regiones. Es necesario un estudio para saber si la clasificación “extraviadas o vagabundas” (“*waij*”) es válida para las dos especies anteriores.

La planta para crecer y funcionar necesita condiciones del suelo favorables tales como nutrición adecuada, suministro de agua, buena aireación y resistencia mecánica baja. Sin embargo, el sodio en alta proporción (suelos sódicos) degrada la estructura del suelo, reduce la porosidad y la permeabilidad, causa pobre relación agua-suelo y aire-suelo, e incrementa la resistencia del suelo aún a baja succión (Rengasamy *et al.*, 2003), condiciones malas para el desarrollo y funcionamiento de las plantas. Así, el suelo con las características anteriores se convierte en ambiente normal para las plantas halófilas más no para las glicófitas. Por otro lado, los suelos yesosos afectados por sales soportan vegetación halófila en vez de vegetación gipsófila (Meyer, 1980; Guerrero-Campo *et al.*, 1999). Por eso en el grupo III (Tabla II.8) predominan plantas (*Suaeda*, *Atriplex*, *Maytenus*, etc) adaptadas al medioambiente creado por el posible exceso de sales solubles y no se tienen plantas gipsófilas. Resultados similares reportan Guerrero-Campo *et al.* (1999) en la Cuenca del Ebro, España, habiendo encontraron predominio de plantas gipsófilas en los afloramientos de yeso y de halófilas en áreas bajas con acumulación de sales.

**5.2.3. Relación del  $pH_{1:2.5}$  y de la  $CE_{es}$  con las sales solubles, carbonato de calcio y yeso.**

Para complementar la información de  $pH_{1:2.5}$  y de  $CE_{es}$  en los sitios de verificación cartográfica (primera campaña) se establecieron relaciones de estas variables con las sales solubles en extracto de saturación, así como con el % de  $CaCO_3$  y de yeso (Figura II.15). Los datos utilizados corresponden a 72 muestras de suelo del Altiplano Potosino y de la Zona Media tomadas en la segunda y tercera campaña con finalidad diferentes a la verificación cartográfica.

En la Figura II.15 solamente se muestran las mejores correspondencias. No se tuvo relación del  $pH_{1:2.5}$  con la  $CE_{es}$ , con el Ca soluble, con el % de  $CaCO_3$  y ni con el % de yeso. Con respecto al pH-Na solamente donde el  $pH_{1:2.5}$  es mayor a 8.5 el contenido de sodio es alto, aunque a valores de  $pH_{1:2.5}$  menor a 8.5 también se tiene alto contenido de sodio (Figura II.15a). Lo anterior posiblemente se deba a que los valores menores de  $pH_{1:2.5}$  se relacionan más con el calcio o con el carbonato de calcio, ya que el calcio amortigua los cambios de  $pH_{1:2.5}$  (Cresser *et al.*, 1993).

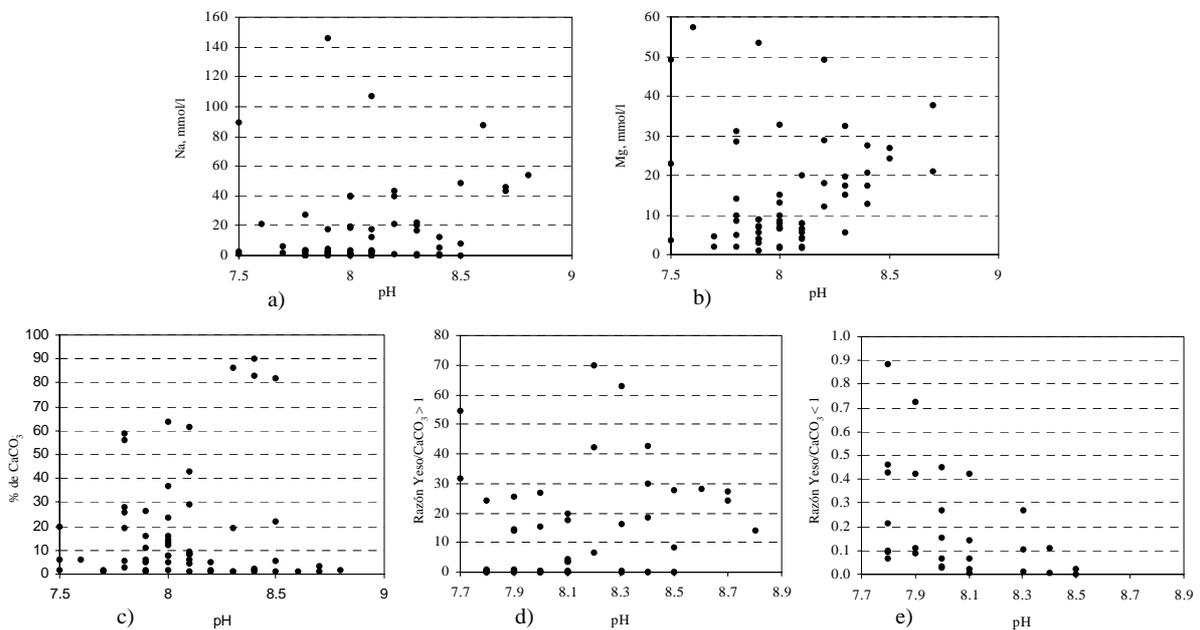


Figura II.15. Mejores relación entre el pH en agua 1:2.5 con las sales en extracto de saturación (Na y Mg), y con la razón yeso/ $CaCO_3$  en las 72 muestras de suelo de la segunda y tercera campaña.

En cambio sí se aprecia una cierta tendencia a incrementar el  $\text{pH}_{1:2.5}$  con el aumento de magnesio soluble (Figura II.15b). En relación al magnesio, Herrero (1982) dice que la salinidad de los suelos de la región de Monegros y Somontano Oscense (Aragón, España) está condicionada por el sodio y por el magnesio, y en casi todos los suelos de su estudio predomina el ión Mg frente al ión Ca. Por otro lado, Porta *et al.* (2003) expresan que los valores de pH entre 8.5 y 9 se pueden deber al  $\text{MgCO}_3$  cuando no hay sodio intercambiable. La no relación entre el pH y el yeso coincide con Boyadgiev (1996), quien dice que el pH no se puede considerar como un criterio diagnóstico válido en la clasificación de suelos yesosos. En la Figura II.15c se esboza que el contenido de  $\text{CaCO}_3$  tiende a disminuir conforme se incrementa el pH, salvo en unas cuantas muestras en las que el  $\text{CaCO}_3$  es mayor al 80 % y el pH varía de 8.3 a 8.5. Tendencia similar presenta el calcio soluble.

Harden *et al.* (1991) expresan que el  $\text{pH}_{1:2.5}$  tiende a decrecer con la acumulación de yeso en suelos con razón yeso/ $\text{CaCO}_3$  mayor a 1. Lo anterior coincide un poco con la razón yeso/ $\text{CaCO}_3$  mayor a 1 (Figura II.15d), es decir esta relación no es tan clara como la obtenida por los anteriores autores, quienes en su trabajo el intervalo de cociente solamente va de cero a cinco, y para los datos de la Figura II.15c va de 1 a 70. Sin embargo en el intervalo del cociente menor a 1 (Figura II.15e), es decir con predominio de  $\text{CaCO}_3$  respecto al yeso, en general conforme aumenta el  $\text{pH}_{1:2.5}$  disminuye el cociente, es decir predominio del  $\text{CaCO}_3$  respecto al yeso, aunque para un mismo  $\text{pH}_{1:2.5}$  existen varios valores de cociente, sobre todo a valores de  $\text{pH}_{1:2.5}$  bajos donde el cociente yeso/ $\text{CaCO}_3$  puede variar de 0.07 a 0.89 para  $\text{pH}_{1:2.5}$  de 7.8.

En la Figura II.16 se presentan las mejores relaciones de la  $\text{CE}_{\text{es}}$  con las sales solubles, el % de  $\text{CaCO}_3$  y % de yeso. No hubo correlación de la  $\text{CE}_{\text{es}}$  con el Ca soluble, ni entre el % de yeso con el Ca soluble, ni del Ca soluble con el % de  $\text{CaCO}_3$ . En la Figura II.16a se aprecia relación directa entre la  $\text{CE}_{\text{es}}$  y el sodio ( $R^2 = 0.75$ ), a mayor  $\text{CE}_{\text{es}}$  mayor contenido de sodio, lo cual corrobora lo mencionado en párrafos anteriores para los datos de las muestras de verificación cartográfica. La gráfica de la Figura II.16b esboza la relación entre el potasio y la  $\text{CE}_{\text{es}}$  ( $R^2 = 0.62$ ) aunque es menos lineal que la relación sodio/ $\text{CE}_{\text{es}}$ , resulta evidente que cuanto mayor es la cantidad de K, mayor es la  $\text{CE}_{\text{es}}$ . La relación de la  $\text{CE}_{\text{es}}$  con el Mg es menos estrecha ( $R^2 = 0.32$ ) y solamente se tienen valores altos donde la  $\text{CE}_{\text{es}}$  es mayor a 10 dS/m, salvo en tres sitios en los que se tienen valores muy altos de Mg más no de la  $\text{CE}_{\text{es}}$  (Figura II.16c). Para suelos calcáreos del Altiplano Potosino Soria (2004) reporta buena

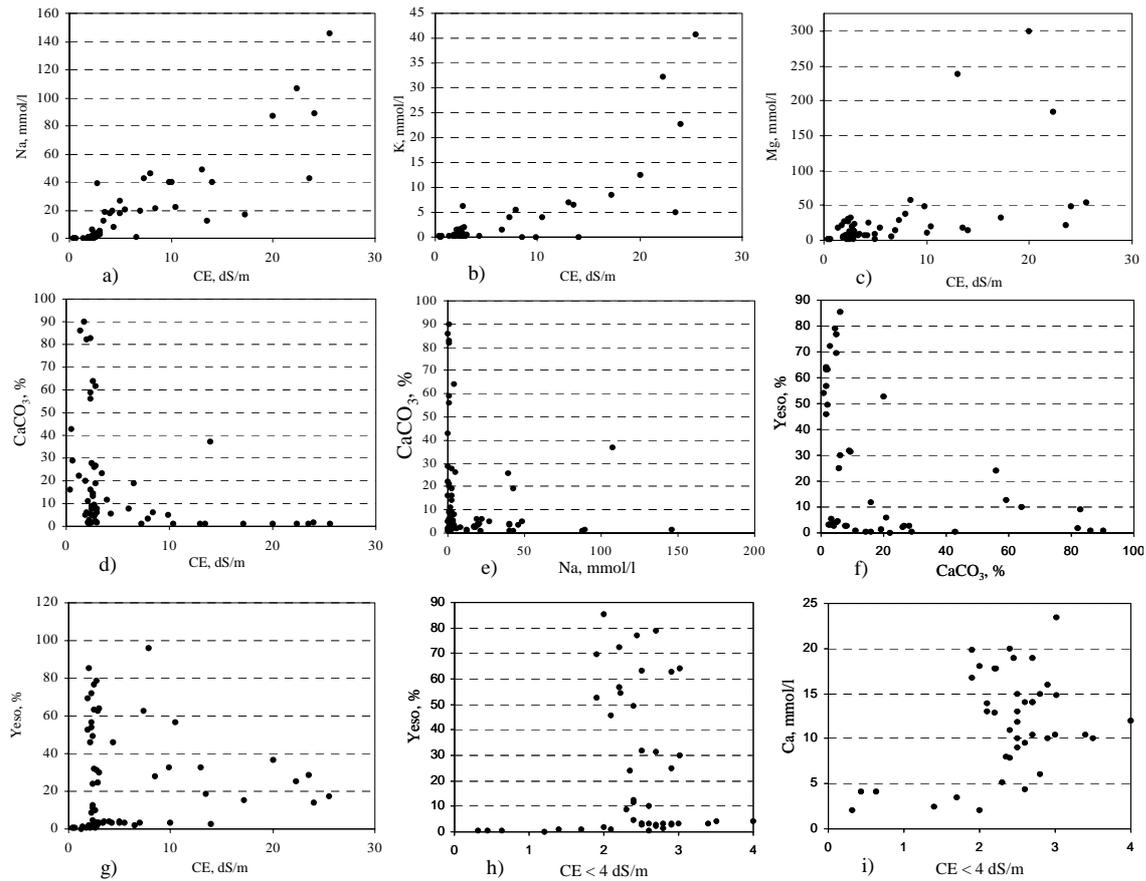
correlación del Ca, Na, Mg, y K con la  $CE_{es}$ , con  $R^2$  de 0.88, 0.76, 0.70, y 0.64, respectivamente.

Hay buena relación entre el  $CaCO_3$  y la  $CE_{es}$  (Figura II.16d), cuando ésta es mayor a 4 dS/m el contenido de  $CaCO_3$  desciende marcadamente. En cambio cuando la  $CE_{es}$  es menor a 4 dS/m el porcentaje de  $CaCO_3$  puede ser cercano a cero o hasta del 90 %, Soria (2004) para suelos calcáreos del Altiplano Potosino encontró correlación significativa ( $0.05 < p \leq 0.01$ ) entre estas dos variables. Comportamiento similar se tiene entre el  $CaCO_3$  con el Na soluble (Figura II.16e). Al considerar las muestras de suelo no salino,  $CE_{es} < 4$  dS/m, para indagar la posible relación entre el % de  $CaCO_3$  con el yeso, solamente se aprecia correspondencia inversa yeso/ $CaCO_3$  (Figura II.16f) incluso con todo el conjunto de datos.

Con lo dicho hasta el momento sobre las sales solubles y la  $CE_{es}$ , y si consideramos que la relación del  $CaCO_3$  con el sodio y el potasio solubles es similar a la que tiene con la  $CE_{es}$ , se puede decir que el Na, el K, y el Ca solubles son los principales iones que intervienen en la salinidad de las muestras de suelo de la segunda y tercera campañas, y que esto es extrapolable a las muestras de los sitios de verificación cartográfica o primera campaña.

Respecto al yeso solamente se aprecia la permanencia de valores menores al 40 % de yeso con  $CE_{es}$  mayor a 10 dS/m (Figura II.16g), pero sin comportamiento definido. Sin embargo se ha utilizado la  $CE_{es}$  para determinar el porcentaje de yeso, basados en que en una solución acuosa saturada de yeso puro a 25 °C la  $CE_{es}$  es de 2.2 dS/m (Porta, 1998). Así Bowers y Huss (1948; citados por Porta, 1998) proponen una tabla crítica para determinar el yeso midiendo la conductividad eléctrica. Esta forma de determinar el contenido de yeso presenta varios inconvenientes tales como la disminución de la solubilidad del yeso debido al efecto del ión común, el incremento de la solubilidad del yeso por la presencia de otras sales (Porta, 1998), o interferencias por la presencia de  $Ca^{2+}$  y  $SO_4^{2-}$  provenientes de fuentes diferentes al yeso (Hamdi *et al.*, 1964). Pese a ello sus resultados han sido similares a otros métodos como el del sulfato, del versenato o al gravimétrico (Hamdi *et al.*, 1964; Meyer y García-Moya, 1989).

Los datos de  $CE_{es}$  graficados en la Figura II.16g se obtuvieron sin eliminar las sales solubles, por lo que comprende la conductividad eléctrica tanto del yeso como de las sales presentes, es probable que por esa razón no exista relación yeso/ $CE_{es}$  incluso donde la  $CE_{es}$  es menor a 4 dS/m (Figura II.16g).



Nota: En las gráficas  $\text{CaCO}_3$ \_yeso no se representan sitios con  $\text{CE} > 4 \text{ dS/m}$ , para indagar su posible relación en suelos no salinos.

Figura II.16. Relación entre la  $\text{CE}_{\text{es}}$  con las sales solubles en extracto de saturación, con el  $\text{CaCO}_3$  y con el yeso en las 72 muestras de suelo tomadas en la segunda y tercer campaña.

De la Figura II.16h se desprende que el contenido de yeso es muy bajo donde la  $\text{CE}_{\text{es}}$  es menor a 2 dS/m, sin embargo en el intervalo 2-3 dS/m el contenido de yeso puede ser de hasta el 90 %. El Ca soluble tiene comportamiento similar al yeso (Figura II.16i). No obstante a comportamiento parecido del Ca soluble y del yeso con la  $\text{CE}_{\text{es}}$ , no se tuvo relación entre el yeso y el calcio soluble, a pesar de que el yeso contiene calcio y a que guarda relación inversa con el  $\text{CaCO}_3$  (FAO, 1990). La no correlación es posible que se deba a que el calcio soluble no solo proviene de la disolución del yeso si no también del carbonato de calcio o de otros minerales que lo contengan.

En el intervalo de 2 a 3 dS/m el porcentaje de yeso puede ser cercano a cero o hasta del 90 %, lo cual puede significar que a cierto porcentaje de yeso la solución del suelo se satura y una vez alcanzada dicha concentración, el incremento en yeso no se manifiesta en la  $\text{CE}_{\text{es}}$  ni en la

concentración de calcio. Meyer (1980) dice que debido a su solubilidad relativamente baja a 25 °C de 2.4 g/l ó 31 meq/l ó de 2.6 g/l para Porta (1998), un suelo con 3 % de yeso tiene suficientes reservas como para mantener la solución saturada con yeso en climas áridos donde no hay lavado. Asimismo, un contenido de yeso mayor al 3 % no tiene más calcio o sulfato en solución que a menor porcentaje de yeso (Meyer, 1980). Por lo anterior cabría esperar más relación yeso-calcio a bajo contenido del primero, siempre y cuando no existan otras fuentes de Ca. Donde la  $CE_{es}$  es mayor a 2.2 dS/m cabe esperar una solución saturada en yeso más la presencia de sales más solubles.

## **6. CONCLUSIONES**

El método de trabajo ha permitido actualizar la cartografía de las áreas yesosas del estado de san Luis Potosí, duplicando la superficie cartografiada por CETENAL a escala 1:50 000, de 193 907 ha se pasó a 397 258 ha. El trabajo de campo y de laboratorio han permitido encontrar áreas yesosas no incluidas en la cartografía de CETENAL, y otras señaladas como yesosas que no lo son.

Los mapas de las áreas yesosas serán de utilidad como referencia para estudios específicos, encaminados a evaluar la aptitud de la tierra con fines productivos. Ello requiere una cartografía más detallada y delimitación de las áreas con presencia del horizonte gípsico y/o petrogípsico somero, delimitando áreas más homogéneas.

La cartografía de CETENAL (hoy INEGI) a varias escalas, es de utilidad como información de referencia para identificar y mapear las áreas yesosas; ya que permite conocer y familiarizarse con este tipo de suelo, sobre todo cuando no se cuenta con expertos en suelos ricos en yeso, situación actual de México. Estos mapas, además, permiten ahorrar recursos (tiempo, trabajo de campo y laboratorio, etc.) en la actualización de la cartografía de las tierras yesosas.

Cerca de la mitad de los suelos yesosos reportados por CETENAL no tienen problemas de sales o estos son leves, el resto del área presenta salinidad moderada a fuerte y/o sodicidad, y de acuerdo a lo observado durante el trabajo de campo se puede extrapolar a las áreas no reconocidas como yesosas por CETENAL. Los suelos salinos sódicos son más extensos en el Altiplano y los sódicos en la Zona Media. En cualquier caso se debe tener en cuenta estos factores al implantar nuevas áreas agrícolas, prefiriendo los cultivos que muestren tolerancia a las sales.

Al establecer nuevos regadíos o introducir mejoras a los existentes se debe considerar el contenido de yeso y profundidad del horizonte gypsico o hipergypsico, prefiriendo el riego presurizado y plasticultura al riego por inundación, con ello disminuirá el riesgo de subsidencia especialmente en áreas con horizonte gypsico somero. De esta forma se llevarán a buen término las acciones que se emprendan.

El sodio, el potasio, el calcio y el cloro determinados en el extracto de saturación, son los compuestos que intervienen más en la salinidad de los suelos. El pH tiene relación con el magnesio soluble, leve con el calcio y el sodio y muy leve con la razón yeso/CaCO<sub>3</sub>. La conductividad eléctrica se relaciona bien con el sodio y el potasio solubles ( $R^2 = 0.75$  y  $0.62$  respectivamente), también se relaciona con el porcentaje de CaCO<sub>3</sub> y levemente con el calcio y magnesio solubles. No existe relación del yeso con el pH ni con la CE.

## 7. LITERATURA CITADA

- Aguilera, N., Soria, J. C., Carral, M. P., Ballesta, R. y Guerra, A. 1997. Clasificación provisional de los suelos de las regiones áridas del estado de San Luis Potosí, México. *Boletín de la Sociedad de la Ciencia del Suelo*, 3-2: 217 – 225.
- Aguirre-Rivera. J. R., Charcas-Salazar. H., Flores-Flores, J. L. 2001. El maguey mezcalero potosino. Consejo Potosino de Ciencia y Tecnología, Gobierno del Estado de San Luis Potosí, Instituto de Investigación de Zonas Desérticas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, SLP, México. 89 pp.
- Báez, Agustín 1999. Efecto de la calidad del agua de riego sobre las propiedades del suelo. Monografía para optar al grado académico especialista en producción vegetal. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. Buenos Aires Argentina. 53 pp. <http://www.inta.gov.ar/barrow/info/documentos/agricultura/pdf/TesisBaez.pdf>.
- Boyadgiev, T. G. y Verheye, W. H. 1996. Contribution to utilitarian classification of gypsiferous soil. *Geoderma* 74: 321 – 338.
- Cachón, A., Nery, G. L. E. y Cuanalo, C. H. E. 1974. Los suelos del área de influencia de Chapingo. Colegio de Postgraduados, Chapingo, estado de México. 73 pp.
- Cervantes, M. A., Flores, O. H., y Valdés J. 2001. Las Euphorbiaceae halófitas y gipsófilas de México, excepto *Euphorbia*. *Anales del Instituto de Biología Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Botánica* 72(1): 1 – 83. México.
- CETENAL, 1971. Cartografía temática escala 1:50 000, cartas: F14-A13, F14-A15, F14-A23, F14-A25, F14-A33 y F14-A35. SPP, México, D. F.
- CETENAL, 1972. Cartografía temática escala 1:50 000, cartas: F14-A14, F14-A24, F14-A34, F14-A45, F14-A55, F14-A57, F14-A67, F14-A76, F14-A77, F14-A86 y F14-A87. SPP, México, D. F.
- CETENAL, 1973. Cartografía temática escala 1:50 000, cartas: F14-A66, F14-C16 y F14-C17. SPP, México, D. F.
- CETENAL, 1975. Cartografía temática escala 1:50 000, cartas: G14-C74, G14-C75 y G14-C84. SPP, México, D. F.
- Ceballos, G., Mellink, E., y Hanebury, L. R. 1993. Distribution and conservation status of prairie dogs *Cynomys mexicanus* and *Cynomys ludovicianus* in Mexico. *Biological Conservation*, 63: 105 – 112.
- Cline, M.G., 1979. Soil classification in the United States. 2<sup>nd</sup> printing. Agronomy Mimeo No 79-12. Cornell University, Ithaca, NY. 207 pp.

- CNA, 2000. Datos climáticos diarios. Comisión Nacional del Agua, Gerencia Estatal San Luis Potosí. Datos en formato electrónico.
- CNA, 2001. Datos climáticos diarios. Comisión Nacional del Agua, Gerencia Estatal San Luis Potosí. Datos en formato electrónico.
- Cresser, M., Killham, K., y Edwards, T. 1993. Soil chemistry and its applications. Cambridge University Press. USA. 192 pp.
- CRM, Consejo de Recursos Minerales, 1992. Monografía geológico – minera del estado de San Luis Potosí. Publicación M-7e. Serie: Monografías Geológico Mineras. Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Subsecretaría de Minas e Industria Básica. Gobierno del estado. 218 pp.
- \_ 1996a. Carta geológico – minera, Matehuala F14-1, escala 1:250 000. San Luis Potosí, Nuevo León, Zacatecas y Tamaulipas. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México.
  - \_ 1996b. Carta geológico minera. Escala 1:50 000, San Vicente G14-C84, SLP. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, México, D. F.
  - \_ 1998. Carta geológico – minera San Luis Potosí F14-4, escala 1:250 000. SLP, Zacatecas y Aguascalientes. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México.
  - \_ 1999a. Carta geológico – minera Ciudad Mante F14-5, escala 1:250 000. SLP, Tamaulipas y Veracruz. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México.
  - \_ 1999b. Carta geológico – minera Guanajuato F14-7, escala 1:250 000. Guanajuato y SLP. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México.
  - \_ 1999c. Carta geológico – minera Ciudad Valles F14-8, escala 1:250 000. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México.
  - \_ 1999d. Carta geológico minera. Escala 1:50 000, Real de Catorce, F14-A24, SLP. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, México, D. F.
  - \_ 2000. Carta geológico minera. Escala 1:50 000, Pozas de Santa Ana (F14-A55) y Guadalcázar (F14-A65). Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, México, D. F.
- FAO/UNESCO, 1968. Clave de unidades de suelos para el mapa de suelos del mundo. Roma, Italia.
- FAO. 1988, Soil map of the world. Revised legend. World Soil Resources Report 60. FAO, Roma. 119 pp.
- García-Calderón, J. 1968. Carta geológica de México, Serie de 1:100 000, Hoja El Salado, 14R – j(11). Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.

- García-Calderón, J. 1978. Carta geológica de México, Serie de 1:100 000, Hoja Santa Rosa 14R-j(12). Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.
- García E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía- UNAM, México, D. F. 246 pp.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. UNAM, México, D. F.
- Gómez-González, A. 1973. Ecología del pastizal *Bouteloua chasei*. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 90 pp.
- Grande-López R. 1967. Pedogénesis de suelos calco-yesíferos del municipio de Matehuala, S. L. P. *Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*, 30, Tomo II: 459 – 476.
- Grande-López. R., Hernández X. E., Aguilera, H. N., y Boulaine, J. 1967. Morfología y génesis de suelos yesíferos de Matehuala, S. L. P. *Agrociencia* 1(2): 130 - 147.
- Grande-López R. 1987. El yeso y sus mecanismos en el suelo. *Acta Científica Potosina*, IX(1): 30 – 50. UASLP, México.
- Guerrero-Campo, J., Alberto, F., Maestro, M., Hodson, J., y Montserrat-Martí, G. 1999. Plant community patterns in a gypsum area of NE Spain. II. Effects of ion washing on topographic distribution of vegetation. *Journal of Arid Environments* 41: 411 – 419.
- Gumuzio, J. y Álvarez, J. B. 1984. Características de Gypsiorthids en la región central española. *Anales de Edafología y Agrobiología* 43: 94 - 110.
- Hajrasuliha, S., Cassel, D.K., y Rezainejad, Y. 1991. Estimation of chloride ion concentration in saline soils from measurement of electrical conductivity of saturated soil extracts. *Geoderma* 49: 117 – 127.
- Hamdi, H., El-Damaty, A., y Hanna, F. 1964. A comparative study for the methods of sulphate and gypsum determination in some soils of Egypt. Lo zolfo in agricultura, Atti del V Simposio Internazionale di Agrochimica, Palermo. 7 *Collada della rivista "Agrochimica"*, Pisa. 151 – 162.
- Harden, J. W., Taylor, E. M., Reheis, M., y McFadden, L. D. (1991). Calcic, gypsic and siliceous soil chronosequences in arid and semiarid environment. P: 1 – 16. In: Nettleton W. D. (editor) Occurrence, characteristics and genesis of carbonate, gypsum and silica accumulations in soils. *SSSA Special Publication Number 26*. Madison, Wisconsin, USA.

- Hermoso de la Torre, C. 1964. Estudio geológico del área Cerritos-Cárdenas, estado de San Luis Potosí. Tesis de licenciatura, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional. México, D. F. 48 pp.
- Herrero, J. 1982. Salinidad del suelo en salobres de Monegros y Somontano Oscense como condicionante de la vegetación. Nueva Colección Monográfica 37-M, Institución “Fernando el Católico”, Diputación Provincial, Zaragoza, España.
- Herrero, J. 1991. Morfología y génesis de suelos sobre yesos. Monografías I.N.I.A. No 77. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Madrid, España. 447 pp.
- Herrero, J., y Porta, J. 2000. The terminology and the concepts of gypsum-rich soils. *Geoderma* 96: 47-61.
- Herrero, J., y Boixadera, J. 2002. Gypsic soils. *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker, Inc. P: 635 – 639.
- INEGI, 1981a. Síntesis geográfica del estado de San Luis Potosí. SPP, D. F., México.
- INEGI, 1981b. Atlas nacional del medio físico. SPP. México.
- INEGI, 1983. Carta estatal de suelos y de vegetación y uso actual, escala 1:1000 000, SLP. SPP, México.
- INEGI, 1995. Espaciomapas 1:250 000, Hojas G14-10, F14-1, F14-4, F14-5, F14-7 y F14-8. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Aguascalientes, México.
- INEGI, 2001. Base de datos geográficos. Diccionario de datos edafológicos (alfanumérico). 40 p. [http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/normatividad/diccio/edaf\\_alf.pdf](http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/normatividad/diccio/edaf_alf.pdf)
- Jackson, M. L. 1982. Análisis químico de suelos. 4ta edición. Traducido por Beltrán Martínez J. Editorial Omega, S. A., Barcelona. 662 pp.
- Jafarzadeh, A. A. y Zinck, J. A. 2000. Worldwide distribution and sustainable management of soils with gypsum. International Symposium on Desertification, Konya. Soil Science Society of Turkey. 9 p. [http://www.toprak.org.tr/isd/isd\\_66.htm](http://www.toprak.org.tr/isd/isd_66.htm).
- Johnston, I. M. 1941. Gypsophily among mexican desert plants. *Journal of the Arnold Arboretum* 22(2): 145 – 170.
- López-Ramos. E. 1973. Carta Geológica del estado de San Luis Potosí. 2da edición. Escala 1:500 000. Instituto de Geología de la UNAM, México, D. F.
- López-Ramos. E. 1976. Geología de México, Tomo II. 3<sup>ra</sup> edición. México, D. F. 446 pp.
- Martín del Campo-Martínez, M. R. 1959. Estudio geológico preliminar de menas aluminosas en el municipio de Guadalcázar, S. L. P. Tesis de Ingeniero geólogo. Facultad Nacional de Ingenieros, UNAM, México, D. F. 50 p.

- Mashali, A. M. 1996. Soil management practices for gypsiferous soils. P 34 – 52. In: Poch, R. M. (ed.) *Proceedings of the International Symposium on Soil with Gypsum 15-21 September 1996*. Edicions Universitat de Lleida, Lleida, Spain.
- Mellink, E. 1989. La erosión del suelo como una amenaza para las colonias de perro llanero, en el norte de San Luis Potosí. *Memorias del VII Simposio sobre fauna silvestre*. Noviembre de 1989, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, UNAM, México. P 68 – 76.
- Meyer, E. S. 1980. The ecology of gypsophily in the eastern Mojave Desert. Dissertation of Doctor of Philosophy. Graduate Faculty of Botany, Claremont Graduate School. Claremont. 199 pp.
- Meyer, E. S., García-Moya, E. y Lagunes-Espinoza, L. C. 1992. Topographic and soil surface effects on gypsophile plant community patterns in central México. *Journal of Vegetation Science* 3: 429-438.
- Meyer, S. E. y García-Moya E. 1989. Plant community patterns and soil moisture regime in gypsum grasslands of north central Mexico. *Journal of Arid Environments*. 16:147-155.
- Mommaerts-Billiet, F. 1971. Note sur l'écomorphologie foliaire de quelques plantes gypsiholes d'Espagne. *Bulletin de la Société Royale de Botanique de Belgique*, 104: 17 – 27.
- Ortlieb, L. y Pierre C. 1981. Génesis evaporítica en tres áreas supralitorales de Baja California; contextos sedimentarios y procesos actuales. *Revista del Instituto de Geología*, Universidad Nacional Autónoma de México. 5(1): 94 – 116.
- Padilla y Sánchez. R. J. 1983. Carta Geológica de México Serie de 1:100 000. Resumen de la geología de la Hoja La Ventura 14R-J(8), estados de Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí y Zacatecas. Instituto de Geología, UNAM, México, D. F.
- Pal, D.K., Srivastava, P., Durge, S.L., y Bhattacharyya, 2003. Role of microtopography in the formation of sodic soils in the semi-arid part of the Indo-Gangetic Plains, India. *Catena* 51: 3 – 31.
- Peech, M. 1965. Chapter 60. Hydrogen-ion activity. P: 914 – 926. In: Black, C. A. (Editor-in-chief) *Methods of soil analysis*. Part 2, Chemical and microbiological properties. *Agronomy* 9. American Society of Agronomy, Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- PDUSLP, 2000. Plan de desarrollo urbano del estado de San Luis Potosí 2000-2020. Secretaría de Desarrollo Urbano, Comunicaciones y Obras Públicas, Gobierno del estado de San Luis Potosí, Secretaría de Desarrollo Social, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Pp. [http://ambiental.uaslp.mx/productos/pduslp/0\\_indice.htm](http://ambiental.uaslp.mx/productos/pduslp/0_indice.htm)

- Pineda-Mares, P., Martínez-Montoya, J. F., Amante-Orozco, A., y Ruiz-Vera, V. M. 2001. Respuesta del maíz al fósforo y un mejorador de suelos en áreas yesosas de la Zona Media de San Luis Potosí. *Revista Chapingo, Serie Zonas Áridas* 2(2): 106 – 113.
- Porta, C. J., López-Acevedo, M. y Rodríguez, R. 1986. Técnicas y experimentos en edafología. Col legi Oficial d'Enginyers Agrònoms de Catalunya. Barcelona, España. 283 pp.
- Porta, J. 1998. Methodologies for the analysis and characterization of gypsum in soils: A review. *Geoderma* 87(1-2): 31 – 46.
- Porta, J., López-Acevedo, M., y Roquero, C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3ª edición. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España. 929 pp.
- Qadir, M., Qureshi, R. H., y AHsbad, N. 1996. Reclamation of a saline-sodic soil by gypsum and *Leptochloa fusca*. *Geoderma* 74(3-4): 207 – 217.
- Rengasamy, P., Chittleborough, D., y Helyar, K. 2003. Root-zone constraints and plant-based solutions for dryland salinity. *Plant and Soil* 257: 249 – 260.
- Richards, L. A. (Ed.) 1974. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Editorial LIMUSA, México. 172 pp.
- SEMARNAP, 1999. Mapa de suelos dominantes (FAO/UNESCO/ISRIC, 1988). Primera aproximación, escala 1:4000 000. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, México.
- SMN, 1976. Normales climatológicas periodo 1941-1970. Servicio Meteorológico Nacional. Dirección General de Geografía y Meteorología, SAG. México.
- Soria, J., Dixon, J., White, N., Guerra, A., y Hallmark, C. T. 2000. Presencia de sepiolita en un suelo de las zonas áridas de San Luis Potosí. P: 89 – 93. In: Quintero-Lizaola, R., Reyna-Trujillo, T., Corlay-Chee, L., Ibañez-Huerta, A., y García-Calderón, N. E. (Eds.) La edafología y sus perspectivas al siglo XXI. Tomo I. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, UNAM, UACH, México.
- Soria-Colunga, J. C. 2004. Génesis, morfología y clasificación de suelos derivados de yeso y caliza en los municipios de Guadalcázar, Villa Hidalgo y Villa Juárez, S.L.P. Tesis de MC. Facultad de Ciencias, UNAM, México, D.F. 182 pp.
- Soil Survey Division Staff, 1993. Soil survey manual. Handbook No. 18. United States Department Agriculture. 437 pp.
- Soil Survey Staff 1960. Soil classification A Comprehensive system. 7<sup>th</sup> Approximation. USDA Soil Conservation Service. U. S. Government printig Office, Washington, D.C. 265 pp.

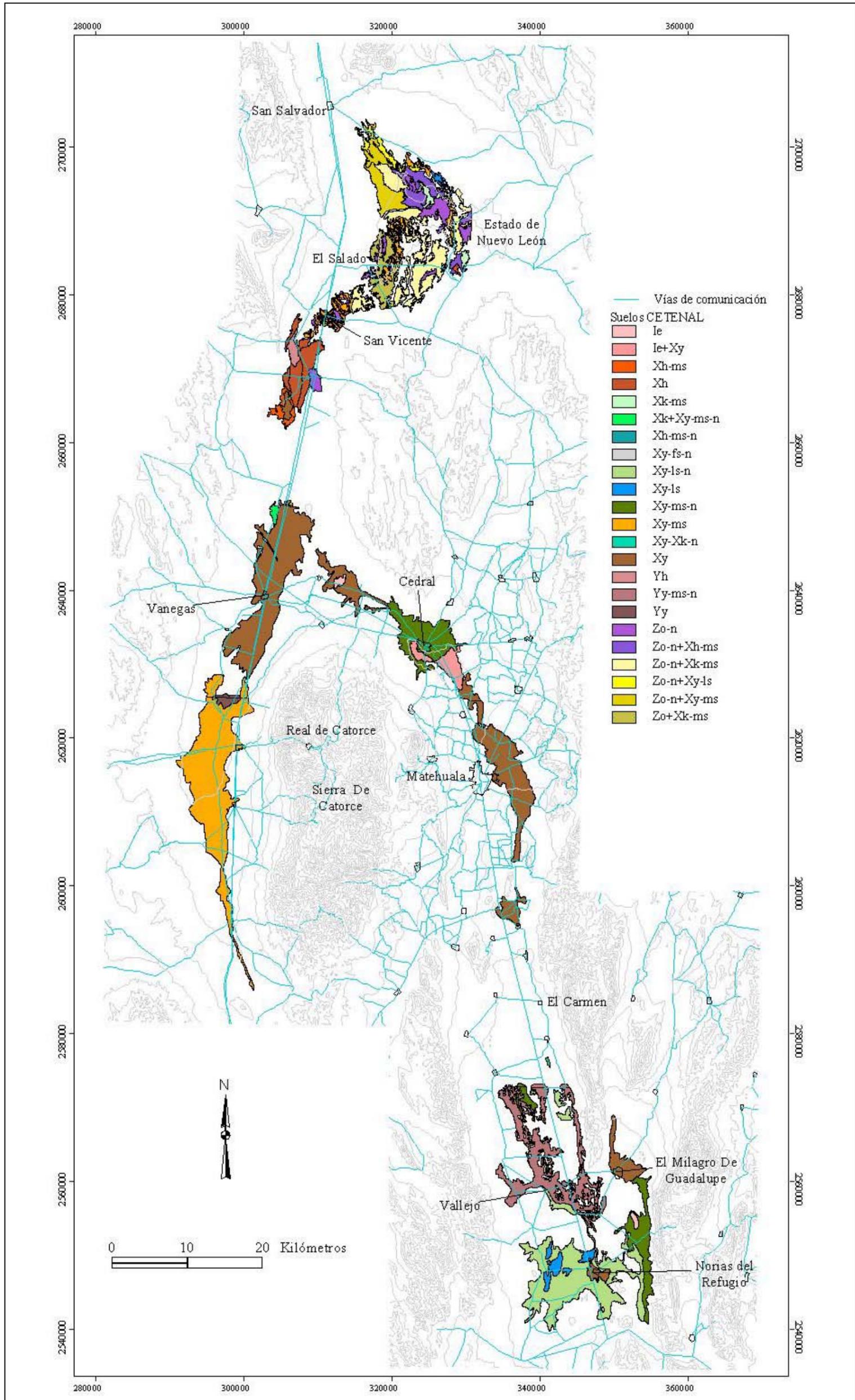
- Soil Survey Staff. 1975. Soil Taxonomy. Soil Conservation Service, Agriculture Handbook No 436. USDA. Washington, D.C. 754 pp.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy. 2ª edición. Natural Resources Conservation Service, Agriculture Handbook N° 436. USDA. Washington, D.C. 869 pp.
- Tchakerian, P. V. 2000. North America. P: 523 – 541. In: Thomas, D. S. G. (Ed.) Arid zone geomorphology. Process, form and change in drylands. Secon edition. John Wiley & Sons. 713 pp.
- Turner, B. L. y Power, A. M. 1979. Deserts, gypsum and endemism. P: 96 – 116. In: Goodin, J. R. y Northington, D. K. (Editors) Arid land plant resources. *Proceedings of the International Arid Lands Copnference on Plant Resources*, Texas Tech University, Lubbock, U.S.A.
- Urías-Rodríguez, A. 1965. Estudio geológico de la Sierra de Guadalcázar. Folleto técnico No 8. Instituto de Geología y Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, SLP, México. 35 pp.
- Urbano, T. P. 2002. Fitotecnia, ingeniería de la producción vegetal. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 528 pp.
- Van Hoesen, J. G. 2000. Pedogenic gypsum in Southern New Mexico: genesis, morphology, and stable isotopic signature. MS thesis, University of Nevada, Las Vegas, 181 pp.
- Verheye, W.H. y Boyadgiev, T.G. 1997. Evaluating the land use potential of gypsiferous soils from field pedogenic characteristics. *Soil Use and Management* 13: 97-103.
- Vonder Haar, S. P. y Gorsline, D. S. 1975. Flooding frequency of hypersaline coastal environments determined by orbital imagery: geologic implications. *Science* 190: 147-149.
- WRB, 1999. Base referencial mundial del recurso suelo. Informes sobre recursos mundiales de suelos No 84. FAO, SICS, ISRIC. Roma. 90 pp.
- Yeaton, R. I., y Flores-Flores, J. L. 2004. Metapopulation ecology of the Mexican prairie dog (*Cynomys mexicanus*) in north-eastern Mexico: An endangered species?. Manuscrito en preparación.

**ANEXO II.1.** Datos medios mensuales de varias estaciones meteorológicas. a) CNA, 2000; b) García, 1988.

Estación	L N	L O	Años con datos		Meses del año												Media anual
					E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
La Morita, <sup>a</sup> Cd. del Maíz 1020*	21° 45'	99° 55'	5	Ev	78.4	103	146	176	184	177	151	158	123	113	107	71.3	1588
			7	P	16.6	7.1	2.9	19	43.8	38.4	40.2	19.4	45.6	28.2	2	17.5	290.7
			7	T	11.9	12.4	14.6	17.7	21.2	22.2	21.3	21.8	20.2	17.6	15.7	11.6	17.4
Las Tablas, Cd. del Maíz <sup>a</sup> 1030	22° 15'	99° 51'	8	Ev	84.7	88.3	115	133	130	135	118	129	111	95.6	86.8	72.2	1299
			10	P	13.5	7.2	6.8	21.5	33.1	27.5	64.4	53.9	55.4	34.4	13.7	17.8	359.2
			10	T	11.5	12.6	14.8	18.3	20.6	21.9	19.9	21.2	20.2	17.6	15.1	12.1	17.2
La Libertad, Cd. del Maíz <sup>a</sup> 1020	22° 44'	99° 50'	3	Ev	133	80	114	99	116	134	86.7	99	88.7	149	124	130	1353
			9	P	9.6	0.5	0.1	12.9	23.4	17.8	39.7	10.5	18.7	23.3	3.4	0.9	160.8
			9	T	14.6	15.4	15	18.5	18.5	18.7	20	19.5	18.6	18.6	16.3	15.5	17.4
Granjenal, Villa Juárez <sup>a</sup> , 1080	22° 23'	100° 04'	5	P	15.9	1.3	20.2	33.5	42.5	26	18	11.5	35.9	42	13	9.5	269.3
			5	T	16.1	16.5	16.1	17.2	18.7	17.4	19.7	20	20.7	18.6	18.5	16.9	18
Cerritos, Cerritos <sup>a</sup> 1135	22° 25'	100° 16'	26	Ev	138	149	203	220	250	224	223	203	185	157	196	2372	
			29	P	20.2	10.5	16.7	37	79.2	107	114	89.5	111	52.3	17.9	16.2	671.4
			29	T	10	11.3	14.5	16.9	18.9	19.6	19.4	19.1	17.5	16.6	13.6	11	15.7
Villa Juárez, V. Juárez <sup>a</sup> 1060	22° 00'	100° 15'	17	Ev	123	130	185	200	213	196	186	186	147	137	123	101	1924
			27	P	16.9	9.7	14.6	19.3	43.8	80	87.9	105	87.9	46.1	19.5	14.4	545
			27	T	10.3	11.5	13.9	17.2	19.3	19.9	19.2	19.1	18.5	15.9	13.8	11.3	15.8
Pastora, Rioverde <sup>a</sup> 1009	21° 10'	100° 02'	28	Ev	95	120	166	180	196	188	168	159	126	115	94.7	85.6	1692
			26	P	9.6	6.9	8.4	19.6	38.2	63.2	65.3	60.3	67.8	41.4	10.2	13	403.9
			26	T	10.3	11.7	14	15.5	19.4	20.6	19.4	19.3	18.5	16	14.1	11.1	15.8
Rioverde, Rioverde <sup>a</sup> 987	21° 55'	99° 59'	28	Ev	83.2	105	157	169	182	168	151	153	123	106	84.6	74.5	1555
			34	P	11.6	8.2	10.1	34.4	35.1	86.7	80.8	71.3	94	45	12.7	11.4	501.4
			34	T	10.4	11.9	14.9	18.7	21.2	21.9	21	21.3	19.8	17.3	14.1	11.9	17
Tepeyac, Cd. del Maíz <sup>a</sup>			9	P	1.6	12.7	4.8	22.8	31.4	35.3	29.7	70.2	31.4	63.8	12.7	9.2	325.6
			9	T	14.8	17.2	18.9	20.8	21.9	23	22	21.8	20.1	20.3	17.6	15.3	18.8
Buenavista, Cd. del Maíz <sup>a</sup>				P	24.7	13.4	11.4	46.1	55.5	49.4	84.4	43.4	34.7	26.4	14.5	15.3	423.5
				T	12.9	14.2	17.1	19.8	21.1	21.6	19.8	20.6	19.8	17.7	15.4	13.8	18
La Cardoncita V. Juárez <sup>a</sup>				P	24	7.7	2	24.8	38	32.8	34.3	36.6	42.9	21.3	8.5	15.8	255.8
				T	12.1	13.2	16.4	17.5	19	18.7	18.8	18.9	17.1	16.2	14.6	14	16
Matehuala <sup>b</sup> 1575				P	13.3	10.7	12.1	24.9	54.6	82.6	64.9	66.2	77.6	36	13.4	15.2	471.5
				T	14.1	15.7	18.5	21	22.6	23.2	22.4	22.5	21.6	19.6	16.6	14.3	19.3
Guadalcazar <sup>b</sup> 1650				P	23.1	25	19.1	19.5	62.5	98.8	127.7	119.7	134	41	24.1	27.6	722
				T	13.7	14.5	17.4	20.9	22.2	21.6	20.3	20.2	19.4	17.7	15.9	14.4	18.1
El Huizache <sup>b</sup> 1370				P	11.7	12.1	9.9	15.7	48.3	56.5	39.4	32.9	55.7	29.6	7.2	17.1	336.1
				T	16	16.8	20.5	22.5	24.2	24	22.7	22.8	22.5	20.8	19.2	17.5	20.7
Vanegas <sup>b</sup> 1815				P	15.2	11.1	9.6	7.1	26.3	44.5	38.9	36.7	53.5	24.5	6.9	17.5	291.8
				T	12.2	13.7	17	20.2	21.6	21.6	21.1	20.6	19.9	17.7	14.4	12.7	17.7

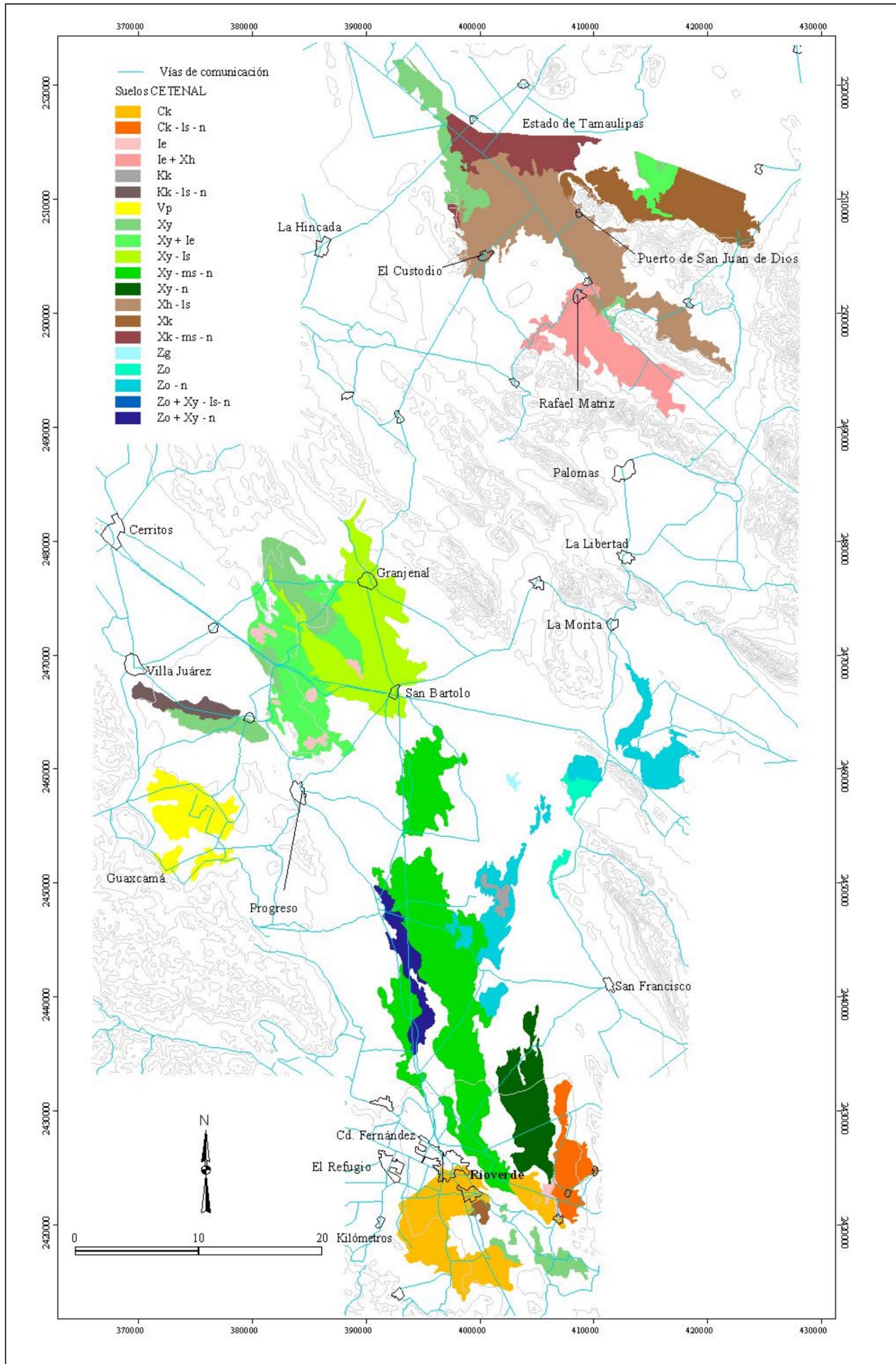
\* Altitud, msnm. T = Temperatura, °C); Ev = Evaporación y P = Precipitación media mensual y anual, mm.

**ANEXO II.2 Mapas**



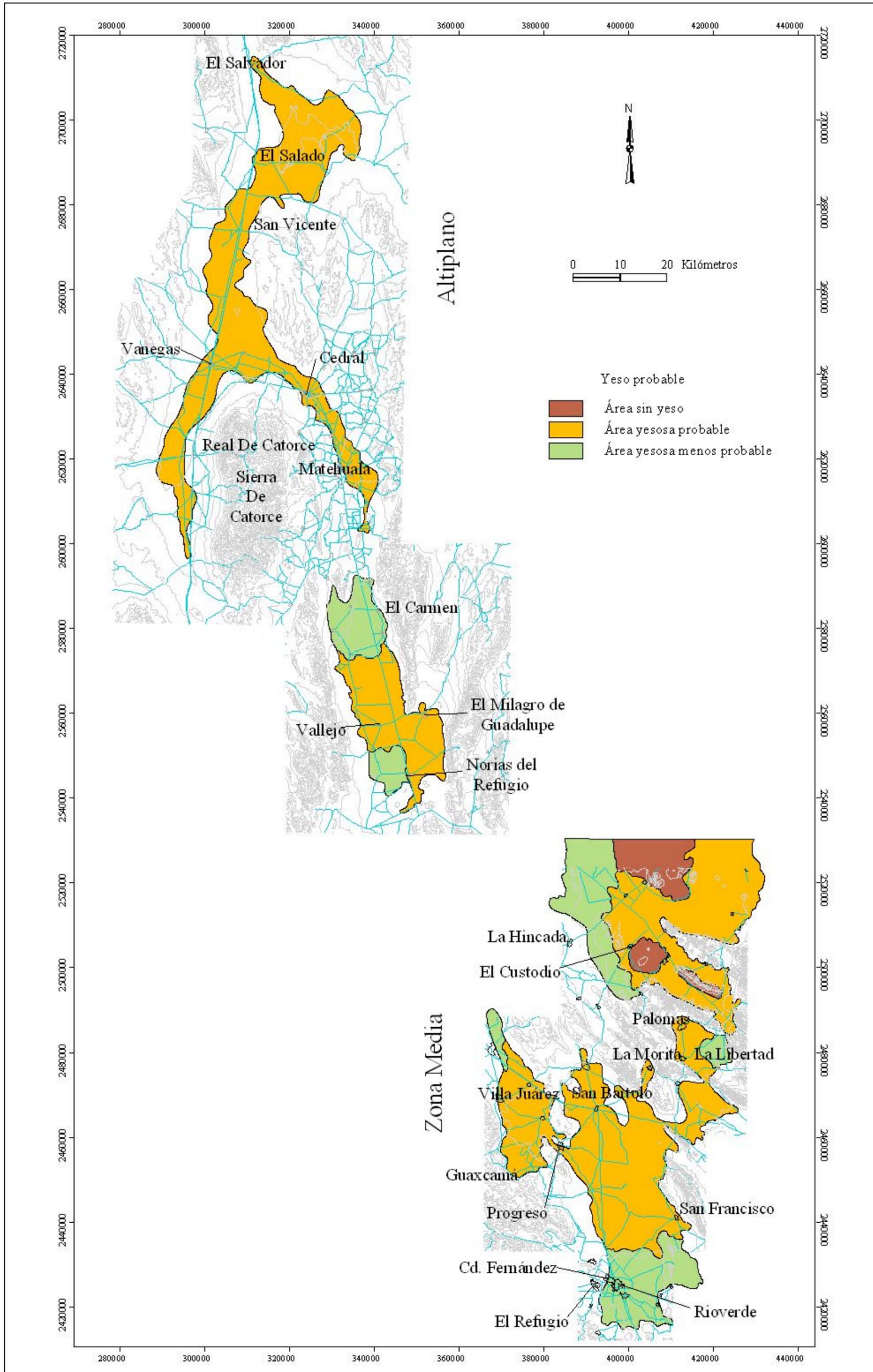
Suelos: Litosol éútrico (Ie); Xerosol gípsico (Xy), háptico (Xh) y cálcico (Xk); Yermosol háptico (Yh) y gípsico (Yy); Solonchak órtico (Zo); fase salina leve (ls), moderada (ms), fuerte (fs) y sódica o nátrica (n).

Mapa II.1. Suelos yesosos reportados por CETENAL (1971, 1972, 1973 y 1975) a escala 1:50 000, Altiplano, SLP

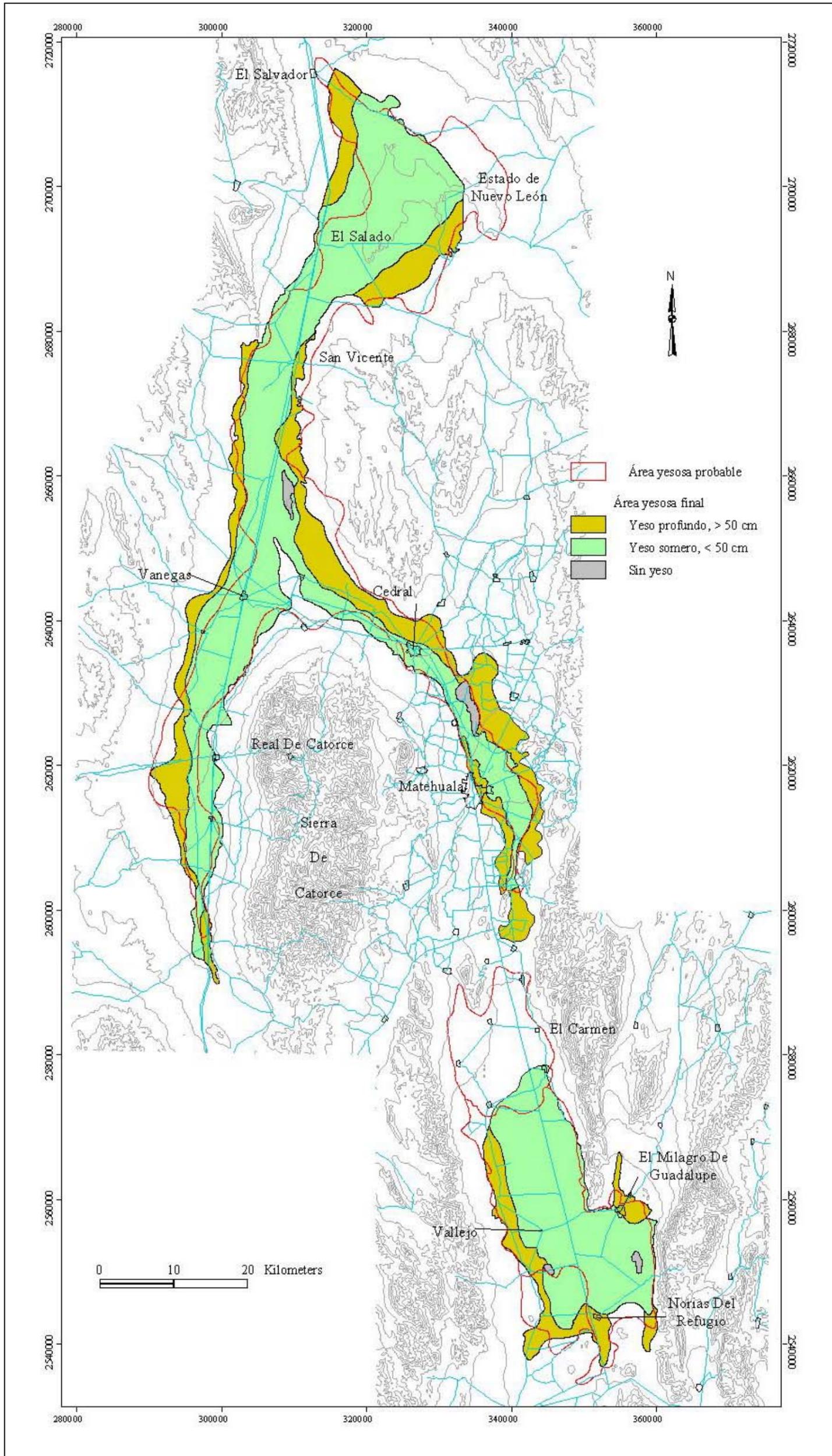


Suelos: Castanozem cálcico (Kk); Chernozem cálcico (Ck); Litosol éútrico (Ie); Xerosol gípsico (Xy), háptico (Xh) y cálcico (Xk); Yermosol háptico (Yh) y gípsico (Yy); Solonchak órtico (Zo); Vertisol pélico (Vp); fase salina leve (ls), moderada (ms) y sódica o nátrica (n).

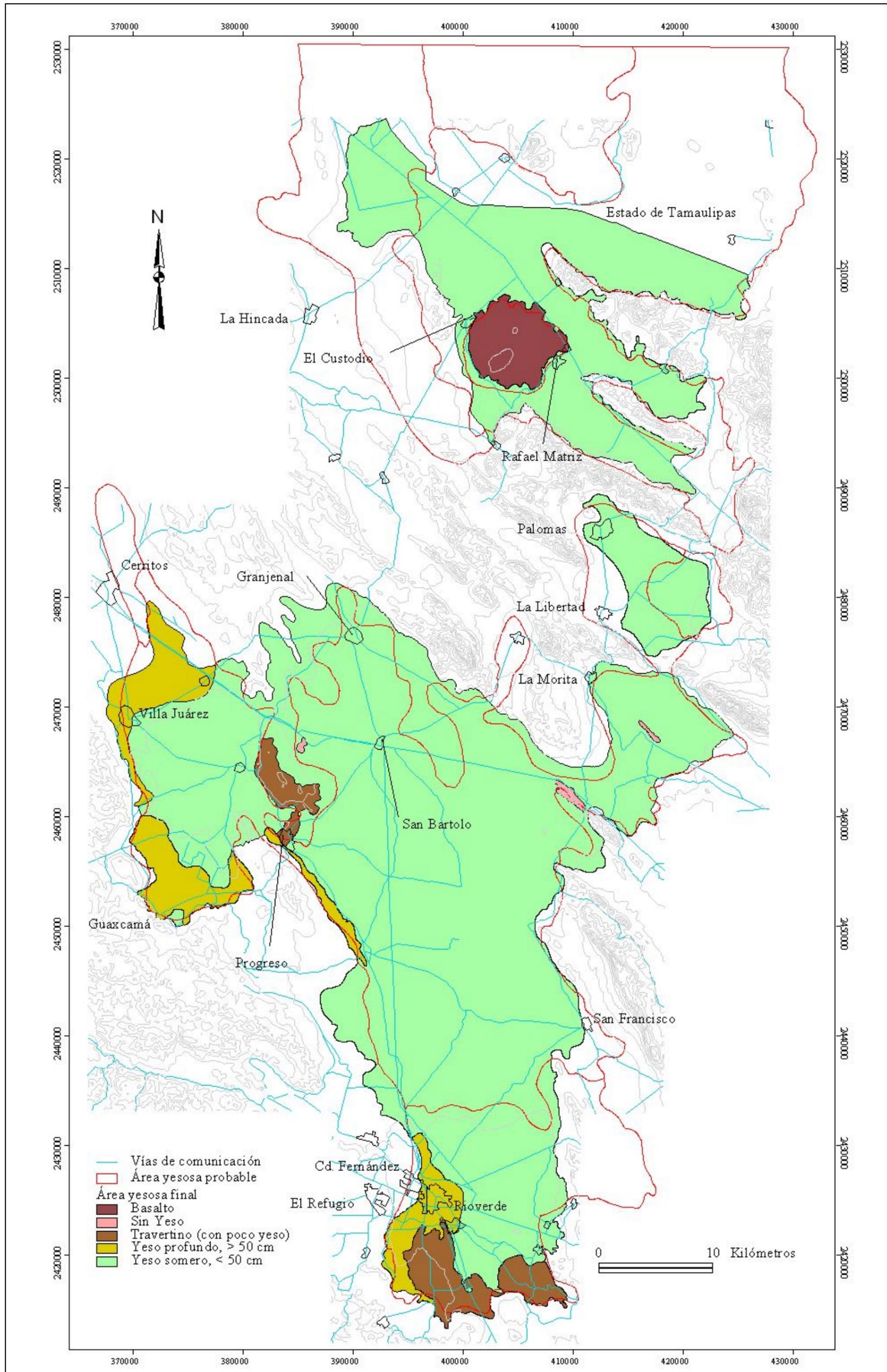
Mapa II.2. Suelos yesosos reportados por CETENAL (1971, 1972, 1973 y 1975) a escala 1:50 000, Zona Media, SLP.



Mapa II.3. Área yesosa probable, resultante de la fointerpretación de pares estereoscópicos y del análisis visual de los espaciomapas.



Mapa II.4. Área yesosa final y probable del Altiplano Potosino



Mapa II.5. Área yesosa final y probable de la Zona Media.

### **CAPÍTULO III**

## **DISCRIMINACIÓN DE TERRENOS O LITOLOGÍA DE YESO MEDIANTE IMÁGENES LANDSAT**

#### **RESUMEN**

Se investiga la utilidad de las imágenes ETM+ en la discriminación de terrenos con yeso edáfico o geológico, y se indaga si la banda del infrarrojo térmico es útil para tal fin. Se estudiaron dos áreas semiáridas, una en Bujaraloz, España y otra en Cedral, Altiplano Potosino, México. En Cedral, las bandas ETM+ 6, 5, 7, 4 y 3 fueron las más útiles para discriminar coberturas relacionadas con yeso somero. En Bujaraloz, para la discriminación del yeso de otras litologías fueron más útiles las bandas ETM+ 7, 5, 6, 4 y 2. Para Cedral, el análisis visual permitió reconocer las áreas ricas en yeso, y en Bujaraloz éste análisis fue de menor utilidad.

Mediante clasificación supervisada y asignación de máxima verosimilitud, en Cedral se encontró que el pastizal gipsófilo se asocia a suelos con horizonte yesoso a menos de 25 cm de profundidad, y que las áreas erosionadas y/o con horizonte petrocálcico superficial se pueden confundir con áreas de yeso somero. En Bujaraloz los mejores resultados se tuvieron con la clasificación multitemporal considerando imágenes de tres fechas, y sobre todo agrupando litologías de acuerdo a la roca dominante. Cuando se trabaja solamente con el área yesosa se tienen mejores resultados con la imagen de finales de la época húmeda; sin embargo, al incluir zonas no yesosas fue mejor la imagen de la época seca, tanto para Cedral como para Bujaraloz. La temperatura ayudó a discriminar los suelos yesosos, principalmente en Cedral. En general el procedimiento seguido permite reconocer terrenos yesosos en Cedral y discriminar el yeso de otras litologías en Bujaraloz.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el estado de San Luis Potosí, México, los suelos ricos en yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ocupan una superficie aproximada de 400 000 ha (Capítulo II). Sin embargo, a nivel nacional se desconoce su extensión y solamente se menciona su presencia en los Desiertos Chihuahuense y Sonorense. Se barajan algunas cifras discrepantes, por ejemplo Jafarzadeh y Zinck (2002) dicen que en México existen 1 100 000 ha de terrenos yesosos. Mashali (1996) para México reporta 78 000 ha de suelos yesosos dedicados a la agricultura, sin embargo la fuente original (FAO, 1990) menciona 7 800 ha ( $78 \text{ km}^2$ ) y se las asigna al estado de Nuevo México, USA. Es apremiante la cartografía de dichos suelos.

En España los materiales ricos en yeso son relativamente frecuentes (constituyen el 7.2 % del territorio) con 16 600 ha de Gypsic Xerosols (FAO, 1990) y, comparando con México, hay más información sobre su extensión. Así en la Cuenca del río Ebro existen cerca de 1.9 millones de ha con litología yesosa, de ellas 575 000 ha pertenecen a la Provincia de Zaragoza (Navas, 1983); y el 13 % (229 619 ha) de esta Provincia corresponde a suelos yesosos (Machín y Navas, 1998).

Estos suelos tienen características específicas y valores en cuanto a diversidad edáfica, plantas y animales endémicos, restricciones físico-químicas para los cultivos, problemas de manejo en regadíos, entre otros. Demandan un manejo especial sobre todo cuando se usan con fines agrícolas, por tales motivos interesa conocer su ubicación y extensión. Sin embargo, para su cartografía, no existe un procedimiento que permita localizar suelos ricos en yeso de forma rápida y precisa.

En el estudio y/o cartografía de los recursos naturales la teledetección espacial ofrece ventajas frente a otros medios de observación tales como las fotografías aéreas o trabajo de campo. Las observaciones desde el espacio proporcionan cobertura global y sinóptica, e información de zonas remotas y de difícil acceso; presentan frecuencia temporal y actualización de datos con alta repetitividad (NOAA cada 30 minutos, SPOT cada 28 días y Landsat 4, 5 y 7 –el último actualmente no operativo- cada 16 días) permitiendo el estudio de fenómenos dinámicos y la actualización continua de la cartografía existente; la homogeneidad de los datos es de gran valor en la cartografía y

en estudio de evolución de fenómenos; su formato digital permite su integración en los sistemas de información geográfica (Chuvieco, 2002; Pinilla, 1995; Sobrino, 2000).

Los datos sobre la superficie terrestre que proporcionan los sensores remotos se han usado en múltiples aplicaciones. Así se han utilizado en estudios de erosión y salinidad del suelo, en geomorfología, en geología, en mineralogía, en edafología, en cartografía del uso y ocupación del suelo, de la temperatura superficial, en predicción de cosechas, de la evolución del cultivo, entre otros (Chuvieco, 2002; Pinilla, 1995; Sobrino, 2000). Además cada día se incrementa el número de investigadores en teledetección y el de las empresas dedicadas a la aplicación de la misma. Ello queda indicado por la abundancia de artículos publicados en revistas especializadas, así como en la gran cantidad de comunicaciones en reuniones científicas (Pinilla, 1995).

A pesar de que la teledetección es una poderosa herramienta auxiliar en la cartografía temática, su uso en el estudio y/o cartografía de terrenos yesosos ha sido menor en comparación a su empleo en el mapeo de otros recursos naturales. Se han utilizado poco los datos de sensores remotos y los resultados obtenidos son variables; además no se ha explorado toda su potencialidad. Las más de las veces se hacen mención a la posibilidad de uso de cierto sensor (Landsat TM o ETM+) o de una determinada región del espectro electromagnético. Por ejemplo, se menciona que las bandas TM1, 5 y 7 (Abd El-Hady, 1992), la banda TM 5 y las composición en falso color TM3,5,7 ó TM2,4,7 (Younis, 1993), los cocientes TM5/TM7 (Mulders y Girard, 1993), TM3/TM1 y TM4/TM2 (Younis, 1993), son de utilidad para la discriminación visual del suelo o litología yesosa.

La banda 6 (infrarrojo térmico) del satélite Landsat TM o ETM+ no es útil para Bryant (1996) por su baja resolución espacial y bajo cociente señal-ruido. Martínez-Ríos y Monger (2002) la descartan por irrelevante en el mapeo de suelos, y Younis (1993) quien en su estudio incluye a materiales yesosos la descarta sin dar razones de ello. Sin embargo para Crowley (1993), Goossens y Van Ranst (1998), Goossens *et al.* (1999) y Panah y Goossens (2000), la banda TM-6 es de utilidad porque complementa la información de las bandas del visible e infrarrojo. Con lo cual, aún se tienen dudas sobre la utilidad de este tipo de datos, sobre todo del satélite ETM+ y de la banda del

infrarrojo térmico. Por otro lado las composiciones en falso color TM247 y TM357 son útiles en la discriminación de afloramientos de yeso (Younis, 1993).

En este capítulo se explora la utilidad de las imágenes Landsat en la discriminación de los suelos o litologías yesosas, usando tanto las bandas 1 a la 5 y la 7 transformadas a reflectancias como la banda del infrarrojo térmico transformada a temperatura superficial. Aunque en la actualidad el satélite Landsat 7 ya no se encuentra en operación, los resultados obtenidos con las imágenes del sensor ETM+ se pueden aplicar sin problema en las del Landsat 4 y 5, con el único inconveniente de la menor resolución espacial del infrarrojo térmico, 60 m en ETM+ y 120 m en los otros dos. Los resultados también son aplicables a datos del satélite ASTER, teniendo presente las diferencias en la anchura de algunas bandas respecto al Landsat 4 y 5 y ETM+, y en la mejor resolución espacial (90 m) en el IRT a la del Landsat 4 y 5 (120 m). El satélite ASTER tiene la desventaja de no estar disponibles todas las escenas, por lo que el acceso a las imágenes es más difícil.

Se indaga la utilidad de datos Landsat, incluyendo la banda térmica, en la cartografía de áreas yesosas. El trabajo se desarrolla en dos regiones yesosas. Una es parte del área yesosa del Altiplano Potosino, México, denominada en lo sucesivo como Cedral, y la otra en Monegros sur, Aragón, España, en lo sucesivo se denomina Bujaraloz. La segunda se utiliza para comprobar la bondad del procedimiento empleado en Cedral, aplicándose éste con ligeras modificaciones.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este apartado se analizan diversas publicaciones -agrupadas en varios puntos- sobre sensores remotos relacionadas con la discriminación de suelos o litologías yesosas o que pueden ser utilizados con dicho fin, para con ello lograr los objetivos planteados en el apartado 3. Se examinan varios aspectos. Primero se revisan los trabajos que tratan las características espectrales del yeso obtenidas en laboratorio. El segundo punto son las publicaciones acerca de utilidad de las imágenes de satélite en la discriminación del yeso. El tercer punto se refiere a publicaciones donde se emplean algunas técnicas o tratamientos de imágenes usados en la discriminación de terrenos o litologías yesosas, tales como el análisis visual, el análisis de componentes principales, el uso del albedo y color del suelo y por último la técnica del elemento puro (*endmember*).

**2.1. Características espectrales del yeso en laboratorio.** Uno de los trabajos pioneros sobre el uso de los sensores remotos en mineralogía, es la generación de la firma espectral del yeso por Hunt *et al.* (1971) y Hunt (1977), (Figura III.1) resaltando los puntos de depresión de su espectro ocasionados por el agua de constitución. Crowley (1991) estudia la reflectancia de minerales sintéticos y en salmuera, concluyendo que la reflectancia en el visible e infrarrojo cercano (0.4-2.5  $\mu\text{m}$ ) puede ser útil en estudios de campo y laboratorio de minerales evaporíticos en áreas de *playa-lake*; y más tarde (Crowley, 1993) con imágenes AVIRIS, demostró la utilidad potencial de la espectrometría de imagen en el estudio y mapeo de minerales evaporíticos, indicando que la banda del infrarrojo térmico puede complementar la información de las bandas del visible e infrarrojo cercano (IRc) en el estudio de las evaporitas.

Lindberg y Smith (1973) al investigar la reflectancia del yeso en el visible e IRc, utilizando espectrofotómetro, encontraron que el yeso disminuye la reflectancia de la costra salina; que el yeso compactado tiene menor reflectancia que las dunas de arena aunque la firma espectral es similar; que después de contaminarse el yeso con evaporitas u otros minerales, desaparecen algunas bandas absorción espectral débilmente expresadas y la intensidad de otras bandas bien definidas y típicas del yeso decrecen.

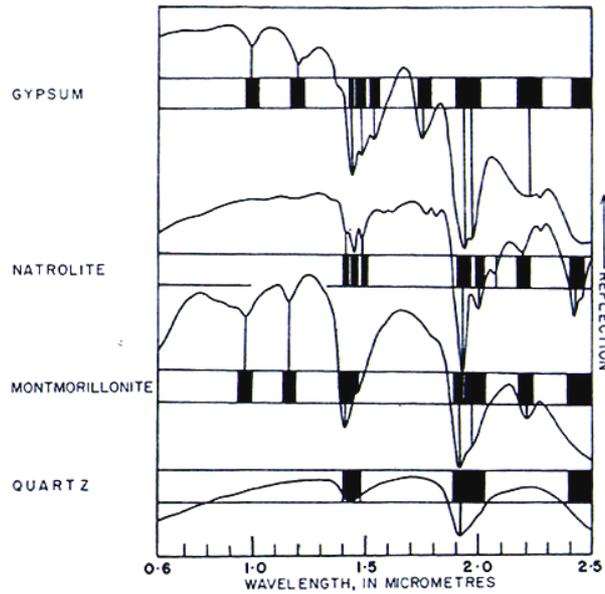


Figura III.1. Firma espectral del yeso en el intervalo visible e infrarrojo obtenida en laboratorio en la que se indican las bandas de absorción (Hunt, 1977).

Por otro lado, Van den Bergh y Bouman (1986) en muestras de cuarzo, calcita y yeso encontraron que la presencia de yeso en la muestra se reconoce claramente debido a su característico hundimiento o depresión en 1.4 y 1.9  $\mu\text{m}$ . (Vries, 1991) dice que el espectro del yeso presenta varias bandas de absorción en 1.4 y 1.9  $\mu\text{m}$  y otras bandas de depresión (1.8 y 2.3  $\mu\text{m}$ ) se deben a vibraciones del  $\text{H}_2\text{O}$  y no son un resultado del sulfato en sí. Suelos con mineralogía gípsica muestran la reflexión espectral más alta (Stoner y Baumgardner, 1980; citados por Vries, 1991).

La curva de reflectancia de la anhidrita es diferente a la del yeso (Vries, 1991) debido a que la primera ya no contiene agua y es más dura (dureza 3 frente a 2 del yeso, escala de Mohs). Este autor dice que el yeso tiene varias bandas de absorción típicas haciéndolo fácil de reconocer. Agrega que la calcita es difícil de detectar cuando está mezclada con yeso y presente en baja proporción, debido a que el yeso también tiene una absorción en 2.3  $\mu\text{m}$ .

La pureza del mineral también es importante en su discriminación. Por ejemplo, Younis *et al.* (1997) mediante análisis por Difracción de Rayos X y medidas de reflectancia en laboratorio en muestras de 20x25 cm correspondientes a yeso fresco (roca subsuperficial con contenido de yeso cercano al 100 %) e intemperizado (roca

superficial o expuesta que además de yeso contiene otros minerales, principalmente óxidos de hierro); encuentran que las diferencias entre las dos clases de yeso son más notorias en la región del visible (400 – 1000 nm) y van desapareciendo hacia el infrarrojo cercano, considerando como punto de inflexión los 1000 nm, donde la reflectancia del yeso fresco decae y la del intemperizado incrementa. En este punto Hunt *et al.* (1971) y Hunt (1977) reportan rasgo de absorción debido a las vibraciones de los enlaces OH<sup>-</sup> fundamentales de la molécula de agua de constitución del yeso.

Younis *et al.* (1997) concluyen que en regiones áridas con escasa vegetación, los productos del intemperismo predominan en las rocas superficiales siendo este un punto crucial en sensores remotos, por ello las diferencias espectrales se deben considerar ya sea para la caracterización espectral de las unidades litológicas, o para la exploración de minerales asociados a las zonas de alteración o a productos del intemperismo.

**2.2. Utilidad de las imágenes Landsat en la discriminación del yeso.** Eastes (1989) explica que la salinidad incrementa el brillo y que el IRm es útil para detectar cambios y cartografiar minerales presentes en costras de eflorescencias, y que conforme se incrementa el porcentaje de halita respecto al yeso se incrementa la reflectancia. Por su parte Abd El-Hady (1992) dice que si los niveles de gris de la banda TM1 son muy superiores a los de la banda TM7 y superiores a los de TM5, entonces la superficie es yesosa. Este autor excluye la banda 6 debido a que por sus características térmicas no es conveniente en estudios similares, es decir junto a las otras seis bandas.

Mulders y Epema (1986) indican las propiedades absorptivas de las bandas TM y que pueden estar relacionadas con la ocurrencia de minerales; así la banda 1 tiene absorción débil por Fe<sup>2+</sup> y Fe<sup>3+</sup>, la banda 2 débil por Fe<sup>2+</sup>, las bandas 3 y 4 débil por Fe<sup>3+</sup>. La absorción en estas cuatro bandas es indicativa de óxidos de hierro. La banda 5 capta la absorción fuerte por SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> indicativo de yeso. Con la banda 6 se capta el estrés de la vegetación, y en la banda 7 se tiene absorción fuerte por los CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> de la calcita, débil por los SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> del yeso o por OH<sup>-</sup> indicativo de silicatos laminares. Agregan que el yeso presenta los mayores valores de ND realizados por la baja cubierta vegetal de las áreas yesosas; además, el yeso presenta valores altos de ND en TM4 y en TM5 por lo que el cociente TM5/TM4 puede proveer información de la ocurrencia de yeso.

Mulders y Girard (1993) en un estudio de suelos yesosos con cubierta vegetal  $\leq 3\%$ , encuentran que la banda TM1 (450 – 520 nm) es útil para detectar minerales ricos en Fe, TM5 (1550 – 1750 nm) para yeso y TM7 (2080 – 2350 nm) para calcita, yeso y minerales arcillosos silicatados. De esta forma con TM5 y 7 se pueden detectar materiales yesosos y calcáreos. El cociente TM5/TM4 realza el contraste entre materiales secos (valores altos, entre ellos el de yeso) y húmedos. En suelo húmedo con mucho yeso baja la señal en TM5 y disminuye el valor del cociente, en comparación a un terreno similar pero seco. Los anteriores autores agregan que los cocientes solamente son efectivos cuando existe mucho contraste entre las bandas. Mougnot (1990) reporta una gráfica de la reflectancia espectral del yeso y la halita en la cual la última presenta valores altos en las bandas TM1, 2, 3 y 4 y bajos en TM5 y 7; en ella el yeso se comporta de forma inversa.

Se ha tratado de diferenciar a los suelos yesosos de los salinos utilizando imágenes Landsat MSS, TM y SPOT, y mediante análisis visual, clasificación supervisada y método de asignación de máxima verosimilitud. Así Goossens y Van Ranst (1998) y Goossens *et al.* (1999) dicen que en la composición en falso color de imágenes TM las diferencias espectrales entre suelos salinos y yesosos son poco evidentes, pero que a pesar de ello las imágenes Landsat TM tienen posibilidades reales de detectar suelos yesosos.

Para estos autores el factor primordial lo constituye la selección de las bandas, dependiendo de ello la precisión de la clasificación. Al respecto, les fueron de más utilidad las bandas TM1 $\approx$ 3, 5, 6, 7 en las combinaciones TM1, 3, 5, 7 y TM3, 5, 6, 7 siendo igual de importantes en la detección de yesos. Como conclusión dicen que los suelos yesosos se mapearon de manera rápida y precisa, y que la banda TM6, por detectar cambios en la temperatura, es clave en la separación de los suelos yesosos de los salinos tanto en condiciones secas como en húmedas.

Al estudiar el efecto de la salinidad en la reflectancia en suelos con yeso sobre o cerca de la superficie, en Ardakan (Irán), Panah y Goossens (2000) no encontraron relación entre la conductividad eléctrica y el ND de imágenes TM en las bandas 1 a 5 y 7, pero sí con la banda del infrarrojo térmico (IRT) sin transformar a temperatura ( $r = 0.387$ ), atribuyéndolo a la temperatura superficial. Dicha relación no se presentó en suelos

salinos ( $r = -0.039$ ). Agregan que el comportamiento completamente diferente de la banda del IRt y bandas 1 a 5 y 7 en suelos yesosos, sugiere que se puede encontrar información importante en el IRt no presente en las otras bandas, y que las bandas 1 a 5 y 7 e IRt se complementan para la discriminación entre suelos yesosos y salinos.

Para Bryant (1996), la banda TM7 del satélite Landsat 5 es importante para el reconocimiento del yeso debido a que el centro de ésta coincide con la absorción del yeso en 2200 nm. En su trabajo descarta la banda 6 por considerarla de baja resolución espacial (píxel de 120 m) y por tener bajo cociente señal-ruido. En Landsat 7 se mejora la resolución espacial de la banda 6 a 60 m, haciéndola más útil. Sin embargo, incluso con sensores de alta resolución espacial y espectral que permiten discriminar bandas o puntos de supresión espectral característicos del yeso u otro mineral, se presentan confusiones. Por ejemplo Drake *et al.* (1999) usando imágenes AVIRIS identifican áreas de yeso cuando con trabajo de campo y DR-X no lo detectan, atribuyendo la confusión a la similitud del espectrograma del yeso con el de la mezcla caolinita y moscovita.

Younis (1993) mediante radiometría de campo, imágenes Landsat TM, y DR-X discrimina unidades litológicas considerando como área mínima 60 - 80 píxeles, ó 5.4 a 7.2 ha, expresa que la respuesta espectral de cada litología está influenciada por la composición mineralógica, la textura (relacionada con la humedad y porosidad) y la materia orgánica. Encuentra que el yeso presenta mayor reflectancia que las lutitas yesosas (tanto en las bandas TM como en filtros radiométricos de campo) en las bandas TM1, 2, 3 y 4 con intervalo de reflectancia de 30 a 50 %, y menor a las lutitas en TM5 y 7 con reflectancia de 15 a 25 %; el yeso también tiene mayor reflectancia a las lutitas en TM4.

El yeso tiene fuertes rasgos de absorción distintivos (en 1.45, 1.75 y 2.2 (m) reflejados en las bandas TM5 y 7 (Younis, 1993). El mismo autor encontró relación directa entre yeso y TM1, 2 y 3, y menos indicativa con TM5 y 7. Sin embargo, sus mediciones de campo no coinciden con las del satélite, en el primer caso los valores de las bandas TM1 a TM4 son mayores a las del satélite y la reflectancia en TM5 y TM7 son menores.

Los valores de los cocientes  $TM3/TM1$  y  $TM4/TM1$  decrecen al incrementarse el contenido de yeso, debido a la mayor reflectancia de  $TM1$  y a la pendiente suave del espectro (Younis, 1993). Sin embargo, la discriminación es muy baja cuando se incluyen más de dos litologías en un índice o cociente. Debido a las confusiones tenidas para la clasificación supervisada de las imágenes  $TM$ , agrupó unidades litológicas similares (de 16 clases pasó a 6, añadiendo la cobertura vegetal y cultivos), incrementando así la posibilidad de separar unidades litológicas de baja dispersión relativa.

### **2.3. Técnicas y tratamientos a imágenes para la discriminación de terrenos yesosos.**

**2.3.1. Análisis visual de imágenes de satélite.** Mediante interpretación visual de imágenes Landsat 5 de Alcantarilla, Murcia, España, Younis (1993) encuentra que los yesos se destacan en amarillo con la composición en falso color (RGB)  $TM357$  y con  $TM247$  en amarillo oscuro, realzándose con la primer combinación. La interpretación visual le permitió a este autor cartografiar afloramientos de yeso nodular dentro de margas y sedimentos del Cuaternario (identificado como tal en campo) no mencionados en el mapa geológico de Alcantarilla editado por IGME (1974) a escala 1:50 000, teniéndose alta correspondencia entre clasificación y verdad terreno. Los buenos resultados obtenidos por Younis (1993) resaltan la utilidad del análisis visual en la discriminación de materiales yesosos.

Dentro de la técnica del análisis visual Allen *et al.* (1996), en interpretación geológica, proponen una secuencia de realces directos para generar imágenes. El proceso consiste en efectuar una clasificación no supervisada para eliminar las clases irrelevantes o que no son de interés, para posteriormente aplicar un realce radiométrico con base al método “Balanced Contrast Enhancement Technique” propuesto por Liu (1991; citado por los autores). Agregan que la imagen resultante es más útil para interpretación geológica y procesamiento final.

En este trabajo, desarrollado en Sorbas (Almería, España) utilizando clasificación no supervisada de imágenes Landsat-5, han encontrado que los afloramientos de yeso natural son inseparables de depósitos del Cuaternario, conglomerado mezclado, margas y areniscas con propiedades espectrales parecidas a las del yeso. Por otra parte el piso de cantera de yeso, en algunos lugares, se confunde con los ND saturados representando

a marga arcillosa, debido al rasgo de absorción por hidratación común en la banda TM7 y con valores saturados en las bandas TM1 a TM5 (Allen *et al.*, 1996).

Los mismos autores con el fin de discriminar el piso de cantera de yeso de la marga arcillosa, y separar suelos cubiertos parcialmente y afloramientos de yeso con vegetación natural de las rocas sedimentarias adyacentes, proponen para el realce y composición en falso color en **Rojo** =  $|(TM5 - TM7) + TM4|$ , **Verde** =  $|TM7 - TM2|$  y **Azul** =  $|TM7 - TM1|$ , con esta composición RGB el piso de cantera de yeso se presenta en rojo; dicen que esta imagen falló en el realce de la distribución de afloramientos naturales de yeso. Agregan que TM6 es una ayuda muy útil para separar yeso de otras litologías, debido a que la firma espectral de la emisión térmica del yeso es mucho más alta que la de margas y areniscas. Con el objetivo de discriminar afloramientos en la planicie central de yeso parcialmente cubierta por suelo delgado y vegetación, incorporan la banda TM6 en otro índice: **Rojo** =  $|(TM5 + TM6) - (TM7 + TM1) + TM6|$ , **Verde** =  $|TM7 - TM1|$  y **Azul** =  $|TM5 - TM7|$ , con esta RGB el piso de cantera de yeso se manifiesta en azul y el afloramiento de yeso natural en rosa y anaranjado.

Neville *et al.* (2000) en un estudio llevado a cabo en *Salt Basin*, Texas, USA mediante análisis de componentes principales de bandas seleccionadas de imágenes del satélite Landsat-5, proponen la ecuación del Índice de yeso superficial,  $IY = (0.147 * TM1) - (0.163 * TM4) + (0.536 * TM5) - (0.815 * TM7)$  para discriminar depósitos de yeso sobre la superficie. Sin embargo, no explican la forma en que obtienen los coeficientes de la ecuación, por lo que es difícil juzgar su aplicabilidad en otras áreas geográficas. Expresan que las bandas utilizadas resaltan los rasgos de absorción de energía en el infrarrojo medio por los OH<sup>-</sup> de las moléculas de agua estructural del yeso en TM7, y los picos de reflectancia del yeso en TM1 y TM5. A la imagen generada la denominan imagen de yeso o índice de yeso superficial. De esta forma discriminan, sin especificar el método utilizado, áreas con arena yesosa en la superficie.

García y Pérez (2001) en un estudio sobre discriminación de gypsisoles mediante Landsat ETM+ al sureste de la provincia de Madrid, utilizan como referencia el mapa de suelos escala 1:200 000, encuentran que los yesos y margas yesosas se discriminan mejor en las bandas del visible (ETM+1-3), presentando tonalidades claras, pero en los

canales infrarrojos se confunden con otros materiales. Agregan que en la banda del infrarrojo térmico los yesos y calizas tienen temperaturas más altas (nivel digital) atribuyéndolo a un menor contenido de humedad y menor cobertura vegetal. Por ello en el mes de agosto estos suelos se calientan más que los materiales más próximos. Respecto a la composición en falso color encontraron que varias combinaciones conducen a equívocos, sin embargo no especifican la más efectiva para la discriminación de yesos, indicando seis combinaciones como buenas: 321, 432, 521, 471, 754, y 573.

**2.3.2. Análisis de componentes principales, ACP.** Mulders y Girard (1993) expresan que los ACP son útiles para mostrar superficies características, tales como suelos yesosos, calcáreos o ricos en cuarzo. También se ha utilizado el ACP para eliminar la información redundante y con ello realzar la composición en falso color o mejorar la clasificación espectral. Martínez-Ríos y Monger (2002) para evaluar la utilidad de las imágenes Landsat TM en el mapeo de suelos de zonas áridas, desierto Chihuahuense, no utilizan la Banda del infrarrojo térmico por considerarla irrelevante en su estudio, pero sin dar más argumentos de esta decisión. Las bandas que les resultaron mejor para identificar unidades del mapa de suelos son la TM2, 4 y 7. El análisis de componentes principales lo realizan en dos grupos de bandas ACP1 = TM1-3, y ACP2 = TM5-7, quedando la banda TM4 fuera del análisis. La exactitud de la clasificación supervisada fue del 70.7 % con las bandas TM2, 4 y 7 y de 66.9 % con ACP.

Para Younis (1993) la composición en falso color (CFC) de las tres primeras componentes principales (CP1, 2, 3) tiene dudoso contraste tonal en la diferenciación de las unidades litológicas. Esta CFC no recoge gran parte de la información de TM en las áreas con alta tonalidad, por ello Chávez *et al.* (1984; citados por Younis, 1993) dicen que todas las bandas juntas no resultan adecuadas para el ACP, y que las tres primeras CP tienen mucho ruido dificultando el análisis visual. La CP1 recoge la información común (topográfica y atmosférica) y la información no común está en la CP2, y por ello ésta es más informativa. Bajo este criterio, Younis (1993) hace un análisis selectivo con TM1-3 y con TM5-7 (visible e IR medio), para el análisis visual considera la segunda CP de cada grupo junto con TM4. Con dicha transformación no mejoró los resultados, ya que la CFC resultó con menor contraste que utilizando los primeros tres CP del conjunto de las seis bandas, y fue similar a la CFC de TM157, TM257 y TM357.

Ferrero *et al.* (2002) dicen que el ACP se puede aplicar como un realce previo a la interpretación visual o a la clasificación, o para estudios multitemporales y detectar cambios en varias fechas. En el último caso las primeras componentes no son las más interesantes porque recogen información común a las distintas fechas, y con las últimas componentes se detecta el cambio. Agregan que cuando se utiliza la CFC de las tres primeras CP, usualmente se distinguen más coberturas que si se utilizan las bandas originales.

**2.3.3. Albedo y color del suelo.** Otro aspecto que se analiza en la literatura es el albedo y el color del suelo, y la relación entre ambos, aunque no se encontraron referencias a suelos ricos en yeso. Es posible que los resultados tenidos al respecto, puedan ser utilizados en la discriminación de terrenos yesosos, por ello se incluyen algunos trabajos en este campo. Por ejemplo para Post *et al.* (2000) el albedo es la propiedad más relevante del suelo relacionada con la reflectancia. Estudian suelo tamizado a 2 mm y alisado, para relacionar el albedo con el color del suelo (tabla de colores Munsell) y predecir el primero a partir del segundo. Encuentran una correlación alta ( $R^2 = 0.93$ ) entre albedo y el brillo o luminosidad (“*value*”), y muy baja con el matiz (“*hue*”,  $R^2 = 0.08$ ) y la saturación (“*chroma*”,  $R^2 = 0.09$ ). Concluyen que conociendo el “*value*” se puede predecir el albedo con la ecuación: Albedo del suelo ( $0.3 - 2.8 \mu\text{m}$ ) =  $0.069$  (“*value*”) –  $0.114$ .

Los anteriores autores encuentran una buena relación lineal múltiple ( $R^2 = 0.96$ ) para el visible e IRc, y recomiendan el uso de la ecuación Albedo del suelo =  $0.785(\text{NIR}) - 0.745(\text{Azul}) + 0.872(\text{Verde}) + 0.01$  para determinar el albedo de suelo desnudo en forma fiable, en el intervalo  $0.3 - 2.8 \mu\text{m}$ . Agregan que ninguna de las ecuaciones funciona en suelo con cubierta vegetal.

Para Matthias *et al.* (2000) el albedo del suelo decrece con el ángulo solar y con el incremento de la rugosidad. Para rugosidad debidas al laboreo, proponen determinar primero el albedo de acuerdo a Post *et al.* (2000) y posteriormente reducir el valor obtenido según la condición del suelo. Bajo este criterio obtienen una  $R^2$  de 0.73 entre albedo y rugosidad bajo condiciones húmedas y secas. Concluyen diciendo que el método propuesto permite conocer el albedo probable de acuerdo a la rugosidad.

Con el incremento de la rugosidad la reflectancia decrece hasta un cierto límite (Mulders y Epema, 1986). Los mismos autores agregan que cuando la rugosidad depende solamente de la textura, entonces superficies arcillosas se pueden considerar suaves o no rugosas para las bandas TM5 y TM7. Martínez-Ríos y Monger (2002) también utilizan el albedo calculado con la ecuación  $\text{Albedo} = (0.322 \cdot \text{TM3}) + (0.725 \cdot \text{TM4})$  pero sin relacionarlo directamente con el color.

Barnes *et al.* (2003) expresan que la relación cuantitativa entre propiedades del suelo y sensores remotos se ha enfocado a la región del visible del espectro electromagnético (0.3 a 2.8  $\mu\text{m}$ ), con alguna relación en la región térmica y microondas y que se tiene diferencia espectral debido a materia orgánica, óxidos de hierro y textura. Agregan que los suelos con costra salina y los que tienen alto contenido de arena producen valores altos en el visible e infrarrojo cercano (NIR) por lo que se pueden confundir.

Schmidt y Karnieli (2001) aplicaron el Índice de Brillo desarrollado por Escadafal y Bacha (1996, citados por los autores)  $\text{IB} = [(\text{Verde})^2 + (\text{Rojo})^2 + (\text{IRc})^2]^{1/2}$  en áreas con cubierta vegetal < 15 % y precipitación promedio anual de 56 mm. El yeso presentó un IB de 0.774, la caliza con hierro de 0.662 y la caliza con dolomita 0.668. Encuentran que el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) entre NDVI e IB fue de 0.055 y entre Índice de Vegetación Ajustado al Suelo, SAVI, e IB de 0.835. Este último responde en forma más sensible al brillo de materiales superficiales.

**2.3.4. Técnica del elemento puro o final, “endmember”.** Esta técnica ayuda a determinar la proporción de cada componente (yeso, caliza, lutita, etc.) dentro de cada píxel en una imagen (White y Drake, 1993). Para ello se deben tener píxeles puros (100 % de pureza) o “endmember” de cada componente, con el fin de ajustar el espectro de esos píxeles a la imagen y estimar su proporción en cada píxel. La composición de píxeles intermedios dependerá de su cercanía a las demás categorías o componentes. Uno de los trabajos realizados en este campo es el de White y Drake (1993) para mapear áreas yesosas y salinas con imágenes Landsat TM. Estos autores detectan costras de yeso, rocas yesosas, dunas de arena yesosa, y costra evaporítica.

En la detección de “*endmembers*” también se han utilizado los resultados del análisis de componentes principales. Así, White y Drake (1993) graficando la CP2 contra la CP3 encuentran elementos puros correspondientes a halita, marga, yeso y roca rica en hierro. Sin embargo, no se puede decir que sea la única o mejor combinación de CP con utilidad para detectar elementos puros, ya que otros autores han empleado otras CP con buenos resultados. Por ejemplo, Bryant (1996) en un estudio sobre la distribución de sales en un “*Chott*” de Túnez, graficando la CP1 contra la CP2 localiza los píxeles puros correspondientes a sombras, vegetación viva, material aluvial, yeso y halita. Lo anterior significa que para cada imagen, región u objeto de estudio se debe buscar la combinación de componentes principales con la que se identifiquen píxeles puros de lo que se esté tratando de discriminar en la imagen.

Koch (2000) mediante difracción de rayos X e imágenes Landsat TM de la región de Los Monegros, Zaragoza, España y basándose en un mapa geológico y de suelos escala 1:50 000 escaneados a 1:200 000. Encuentra que la metodología del elemento final le permitió separar y mapear grupos de suelos con yeso, calcita y mezclados. Agrega que la pendiente TM5-TM7 es mayor en los suelos yesosos debido a que el valor de TM7 es más alto en caliza que en yeso. En general, en campo encuentra que los suelos claros corresponden a yeso y los oscuros a calcita. También dice que en el área de estudio el yeso decrece de Oeste a Este acompañado por un gradual incremento en margas y calizas, y que los elementos finales 1 y 2 confirman esta tendencia espacial.

**2.4. Conclusiones de la revisión bibliográfica.** Algunas conclusiones de la revisión de los trabajos mencionados sobre el uso de sensores remotos en el estudio de suelos yesosos son:

- a) El conocer el comportamiento espectral del yeso obtenido en laboratorio puede ser útil para discriminar suelos o litologías con yeso.
- b) No existe acuerdo acerca de si el infrarrojo térmico, transformado a temperatura superficial, es útil en la discriminación de suelos yesosos.
- c) Las bandas ETM+1, 2, 3 por un lado y ETM+5 y 7 por otro, son útiles para detectar yesos. Por ejemplo: si el nivel de gris de ETM+1 > ETM+5 y de ETM+7 es muy posible que se trate de yeso.
- d) Algunas composiciones RGB (741, 137, 157) del Landsat ETM+ son de utilidad para la discriminación visual del suelo o litología yesosa.
- e) Algunos cocientes u operaciones algebraicas (ETM5/ETM7, ETM5-ETM4, ETM5-ETM7) se pueden utilizar para detectar áreas yesosas o evitar confusiones.
- f) No se ha explorado la utilidad del índice de brillo de la transformación Tasseled cap, el albedo y el color del suelo (“value”) en la discriminación de suelos yesosos.
- g) El análisis de componentes principales (ACP) en grupos de bandas [visible (ETM+1 a 3), IR cercano (ETM+4) e IR medio (ETM+5 y 7)] es más útil en la discriminación visual de terrenos yesosos, que el ACP considerando las seis bandas. Además, con la CP1 y CP2 del ACP con seis bandas es posible encontrar píxeles con predominio de una litología, entre ellas la del yeso.
- h) Las bandas del satélite Landsat ETM+ que han sido de mayor utilidad para la clasificación espectral son ETM+1≈3, 5, 6 y 7.

### 3. OBJETIVOS.

Los objetivos planteados en el presente capítulo son:

- a) Establecer un procedimiento que permita localizar los terrenos ricos en yeso o discriminar el yeso geológico de otras litologías, utilizando imágenes ETM+ del satélite Landsat 7.
- b) Explorar la utilidad de la banda del infrarrojo térmico del sensor ETM+ transformada a temperatura superficial en la discriminación de éstas áreas.

### 4. MATERIAL

#### 4.1. Características de las áreas de estudio.

**4.1.1. Localización.** La zona de trabajo de España se localiza en parte de los municipios de Bujaraloz y Sástago de la provincia de Zaragoza y de Peñalba de la provincia de Huesca. Sus coordenadas extremas son  $41^{\circ} 34' 48.5''$  –  $41^{\circ} 18' 10''$  N y  $0^{\circ} 27' 20''$  O –  $0^{\circ} 4' 32''$  E. Forma parte de la comarca Los Monegros (Figura III.2). La zona de estudio de México se ubica en el estado de San Luis Potosí, en el área conocida como Altiplano Potosino. Comprende parte de los municipios de Vanegas, Cedral, Matehuala y Real de Catorce, con coordenadas:  $23^{\circ} 42' 35''$  –  $23^{\circ} 55' 18''$  N y  $100^{\circ} 34' 7''$  –  $101^{\circ} 5' 14''$  O (Figura III.2).

**4.1.2. Clima.** En Cedral el clima es semiárido con temperatura promedio anual de  $16.5^{\circ}\text{C}$  en Vanegas (García, 1988) y de  $17.3^{\circ}\text{C}$  en Cedral (CNA, 2000). La precipitación promedio total anual es de 291.8 mm en Vanegas (García, 1988) y 373.9 mm en Cedral (CNA, 2000), con lluvias principalmente en verano (Figura III.3). La evaporación en Matehuala, con datos de 1941 a 1970 (SMN, 1976), es de 2195 mm/año superando hasta por 4.5 veces a la precipitación (479 mm/año). La altitud de las partes bajas (llanuras y lomeríos), varía de 1820 en Vanegas a 1680 en Cedral. En la Sierra de Catorce la altitud alcanza los 3140 en el Cerro Grande, fuera del área de estudio (Figura III.3).

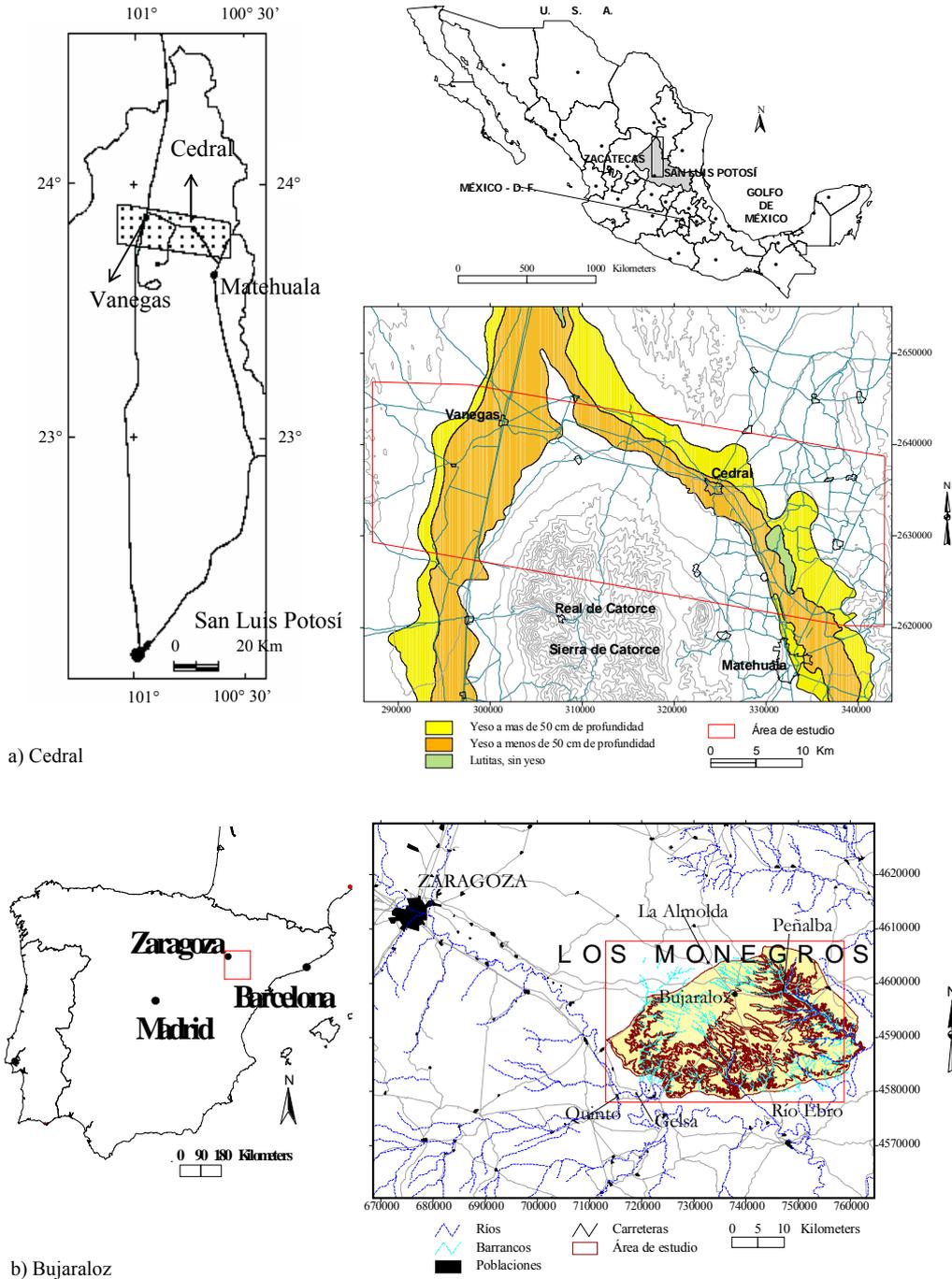
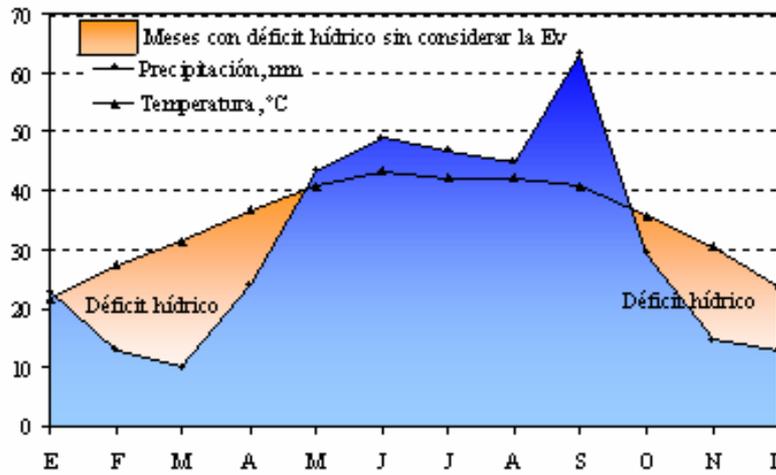
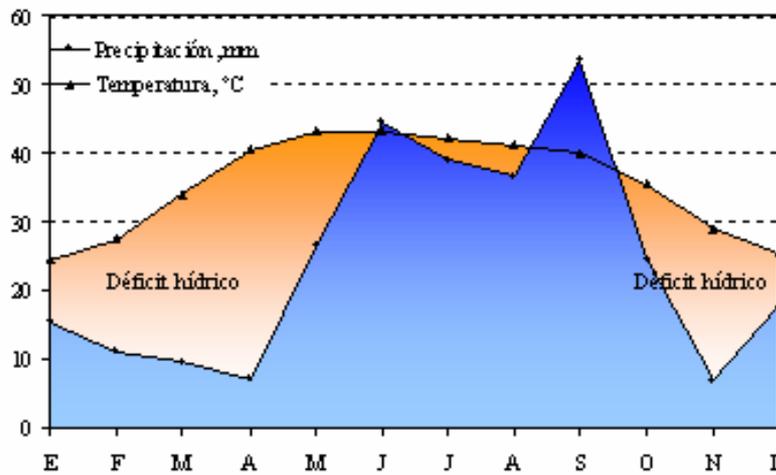


Figura III.2. Localización de las áreas de estudio, Cedral (a) y Bujaraloz (b). Para Cedral se indican las áreas yesosas (yeso somero < 50 cm y profundo > 50 cm) a las que se hace referencia en lo sucesivo.

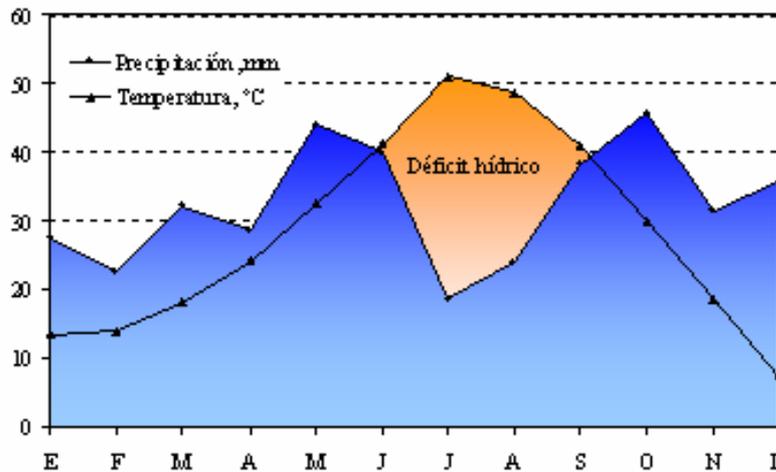
En Bujaraloz el clima es semiárido con precipitación promedio anual de 388.3 mm y temperatura media anual de 14.5 °C, los meses menos lluviosos son julio y agosto (Figura III.2), y la evapotranspiración media anual es de 1183 mm (Martínez-Cob *et al.*, 1998). La altitud va desde 418 m en el Purburell a 320 m en la plataforma (Figura III.5).



Cedral, Cedral (CNA, 2000. Periodo 1980-1999). 23° 48' N; 100° 44' O, Altitud 1730 m



Vanegas, Vanegas (García, 1988). Altitud 1815 m  
Régimen de humedad Aridic y de temperatura Thermic, en ambas estaciones



Bujaraloz, Zaragoza, España (Martínez *et al.*, 1998). 41°30' N; 0° 09' O, Altitud 327 m. Periodo 1931-1980  
Régimen de humedad Aridic y de temperatura Mesic-Thermic

Figura III.3. Diagramas ombrotérmicos de las estaciones meteorológicas de Cedral y Vanegas, México y del observatorio meteorológico de Bujaraloz, Zaragoza, España (temperatura multiplicada por dos).

**4.1.3. Fisiografía y geología.** El área de estudio de Cedral fisiográficamente se trata de una región con llanuras (valles), lomeríos, bajadas (unión de varios abanicos aluviales en las sierras formando la ladera baja o pie de monte), y sierras (INEGI, 1983). En la Figura III.4 se representan las llanuras, lomeríos y bajadas. De acuerdo a CRM (1996) en la bajada (faldas de la Sierra de Catorce) se tiene conglomerado polimíctico del Terciario Neógeno, o del Jurásico Superior en partes más altas; en otras áreas se le encuentra junto con areniscas del Terciario Paleoceno.

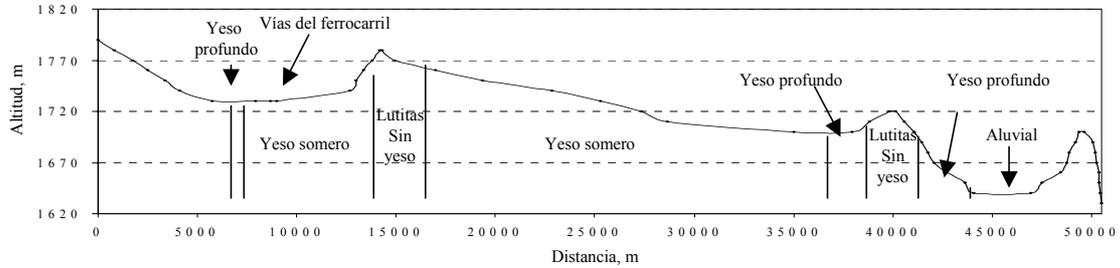
En la Sierra Catorce y en algunos lomeríos existe caliza, lutita y arenisca del Cretácico Inferior y Superior; caliza del Jurásico; limolita del Jurásico Superior y algunas áreas con basalto del Terciario Neógeno. Algunos lomeríos están constituidos por conglomerado mal clasificado sin o con cementación, formando colinas subredondeadas (CRM, 1992).

A los depósitos aluviales (llanura o valle), García (1968) los divide en tres tipos; el primero se presenta en “pie de monte” formando parte de los abanicos aluviales y constituido principalmente por grava y algo de arena, limo y arcilla; el segundo está formado por arenas, arcillas y limos con cementante calcáreo y con frecuentes capas de caliche (horizonte petrocálcico); el último aluvión tiene materiales clásticos similares al anterior pero con alto contenido de yeso, en este punto coincide con CRM (1992).

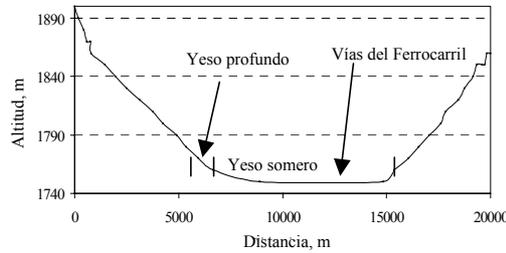
La región de Bujaraloz está integrada por Sierras, lomeríos, planicies cortas con lomeríos suaves y depresiones, y valles de fondo plano llamados vales en femenino, “val” en singular (Figura III.4). Al Este limita con el barranco de Valcuerna, al sureste con Serreta Negra, al oeste por la divisoria de aguas superficiales de La Retuerta, al sur por el escarpe que se dirige hacia el río Ebro y al norte por la Val Cardosa o carretera N-II (Salvany *et al.* 1996; Castañeda, 2002).

De acuerdo con Salvany *et al.* (1996, Figura III.5) y modificaciones posteriores al mapa por Salvany (comunicación personal, 2002) digitizado en el CITA, la geología corresponde a depósitos detríticos y lacustres del tránsito Oligoceno-Mioceno. Los primeros son facies aluviales distales que forman tramos lutíticos de color rojizo con

capas de arenisca y limolita intercaladas. Los depósitos lacustres se componen de yeso y caliza y en partes están recubiertos por sedimentos cuaternarios coluviales, aluviales y eólicos que rellenan fondos de los valles, barrancos, depresiones y lagunas. Los materiales terciarios presentes son yeso, caliza, margocaliza y lutitas.

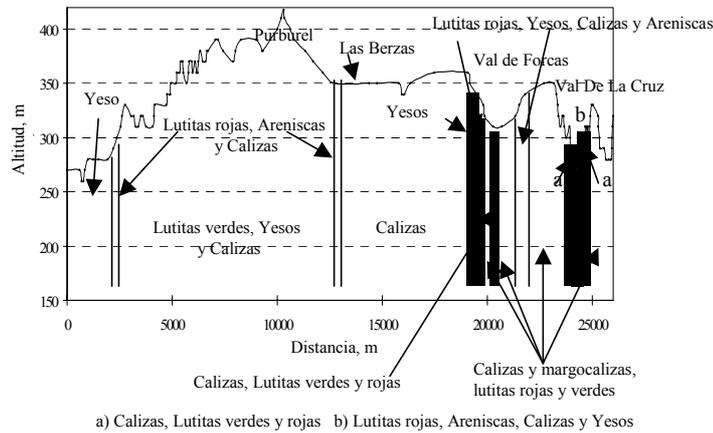


Perfil topográfico 1, del punto 2650000 - 295000 a 2628225 - 340550 (UTM). Dirección NO - SE.



Perfil topográfico 2, del punto 2635000 - 287500 a 2635000 - 307425 (UTM). Dirección O - E.  
Carta topográfica escala 1:50 000 F14-A13, F14-A14 y F14-A15 (INEGI, 1971)

a) Cedral, México



a) Calizas, Lutitas verdes y rojas b) Lutitas rojas, Areniscas, Calizas y Yesos  
La línea empieza en el cruce de las carreteras Nacional-II \_Gelsa (A-1105 \_ N-II), pasando por Purburel, parte más alta (418 m) y por La Quemada. Dirección de la línea 52° NO-SE. Mapas escala 1:25 000: 413-II, 413-IV y 414-III (IGN, 2002)

b) Bujaraloz, España

Figura III.4. Perfiles topográficos o altitudinales del área de estudio en Cedral y Bujaraloz.

Tabla III.1. Unidades Litológicas de la zona endorreica de Bujaraloz-Sástago (Salvany *et al.*, 1996) y nombres simplificados utilizados para las clases temáticas.

Unidad Litológica	Clase temática
Lutitas rojas, areniscas, calizas y yeso	Lutita-arenisca
Calizas, margocalizas, con lutitas rojas y verdes	Margocaliza
Calizas, lutitas verdes y rojas	Caliza-lutita
Lutitas rojizas con algún nivel de calizas	Lutita rojiza
Lutitas rojas, yeso, caliza y areniscas	Lutita roja-yeso
Yeso, caliza y lutita	Yeso
Yeso, caliza y lutita (depresiones)	Yeso depresión
Caliza	Caliza
Lutitas rojas, areniscas y calizas	Lutita roja
Lutitas verdes, yesos y calizas	Lutita verde-yeso
Lutitas verdes y calizas con niveles de yesos	Lutita verde-caliza
Aluviones (limos yesíferos y arcillas)	Aluvión

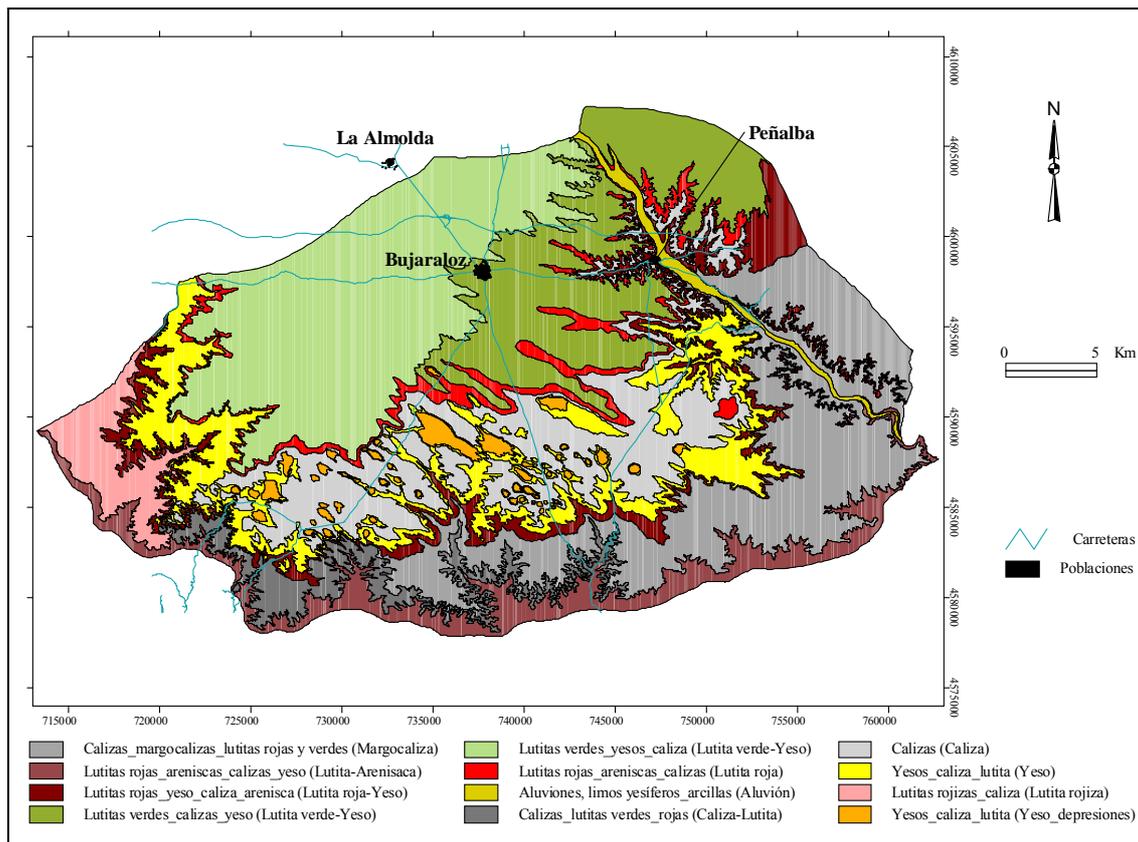


Figura III.5. Mapa litológico de la zona endorreica Bujaraloz-Sástago (Salvany *et al.*, 1996) modificado posteriormente por Salvany (comunicación personal, 2002) digitizado en el CITA. Entre paréntesis están los nombres simplificados utilizados en lo sucesivo.

El yeso se presenta en capas en facies nodular o en nódulos dispersos entre las otras litologías, con matriz internodular lutítica o carbonatada. La caliza y margocaliza forman capas tabulares de color beige, aisladas entre lutitas y yesos o superpuestas. La lutita es de color rojo o naranja, gris o verde como material encajante entre yeso y caliza. En general distingue doce unidades litológicas (Tabla III.1, Figura III.5). Para la misma región, Koch (2000) menciona que se tiene un cambio lateral desde una facies rica en yeso al oeste a una facies rica en carbonatos al este.

**4.2. Material utilizado.** En la Tabla III.2 se describen los materiales más importantes usados en ambas áreas de estudio.

Tabla III.2. Materiales utilizados en las dos áreas de estudio

<b>Material</b>	<b>Cedral</b>	<b>Bujaraloz</b>
Imágenes Landsat ETM+	Traslape de las imágenes (1852x976 incluye píxeles sin información): 28/43, del 28 de noviembre de 1999 28/44 del 19 de marzo del 2000.	Subescenas (1737x1233) de las imágenes 199/31 del 2000 y fechas del 17 de marzo, del 21 de junio y del 8 de agosto del 2000.
Mapas	Carta edafológica, geológica topográfica, y de vegetación y uso del suelo a escala 1:50 000 hojas F14-A 14, 23 y 25 (CETENAL, 1972), y carta estatal de suelos y vegetación y uso actual 1:1000 000 (INEGI, 1983). Mapa de áreas yesosas generado en el capítulo anterior.	Mapa geológico 1:50 000 (Salvany <i>et al.</i> , 1996). Mapa topográfico 1:50 000 Hojas 413 y 414 (Servicio Geográfico del Ejército, 1985 y 1983, respectivamente). Mapa topográfico 1:25 000 hojas 413 y 414 (IGN, 2002).
Fotografías aéreas	Ninguna	Ortofotos vuelo 1997 (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación)
GPS	Ninguno	Garmin
Tabla de colores Munsell	No	Sí
Software	ERDAS 8.4 ArcView 3.1 ILWIS 3.0 Academic	ERDAS 8.4 ArcView 3.1 ILWIS 3.0 Academic ArcInfo v 7.1

## 5. MÉTODO.

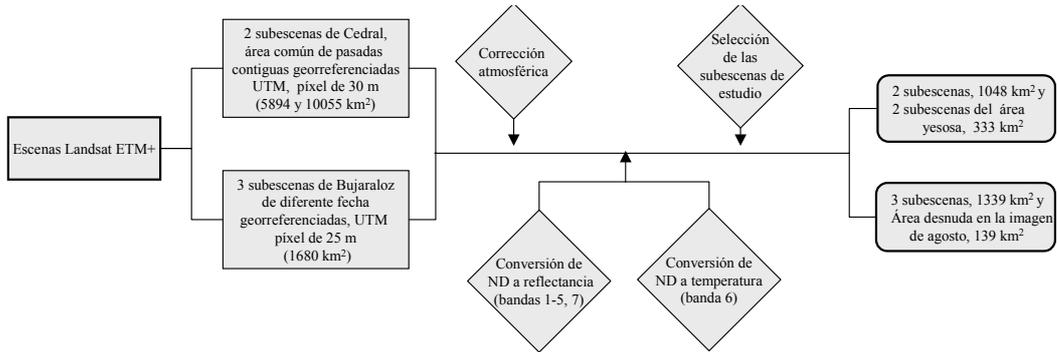
El método de trabajo consta de dos etapas. La primera consistió en una serie de procesos tendientes a mejorar la calidad de la imagen para su posterior análisis, y en la obtención de las subescenas de trabajo. La segunda etapa llamada procesamiento de imágenes consistió en la extracción de la información de las imágenes, realizándose primero el análisis visual y luego el digital. La Figura III.6 presenta un esquema de las operaciones efectuadas, que se describen con más detalle en los apartados siguientes.

**5.1. Procesamiento previo de las imágenes.** Las operaciones fueron: remuestreo y corrección geométrica, corrección atmosférica y transformación de los niveles digitales de las bandas 1 a 5 y 7 a reflectancia, y los de la banda 6 a temperatura superficial. Asimismo se hicieron los recortes del área de estudio común a las dos imágenes contiguas de Cedral y del área de estudio de Bujaraloz (Figura III.6).

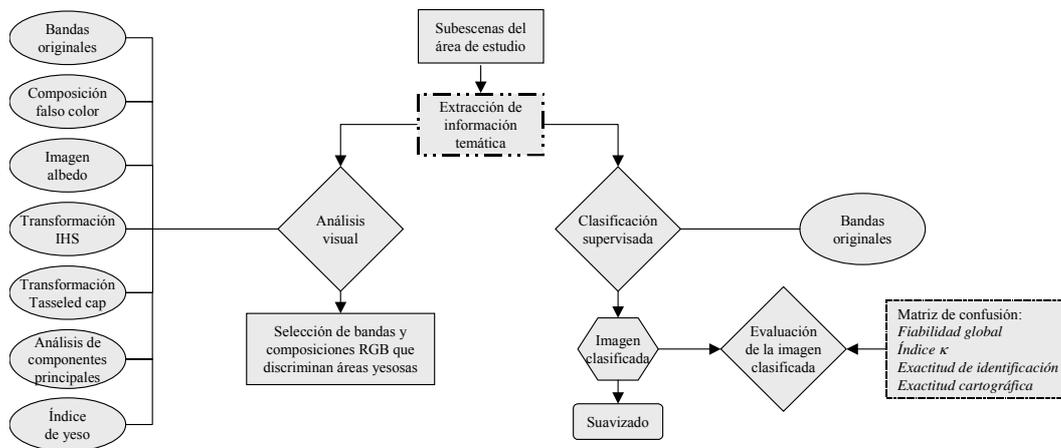
**5.1.1. Georreferenciación y remuestreo.** En Cedral las subescenas corresponden a las imágenes Landsat ETM+ 28/43 del 28-11-1999 de finales de la época húmeda, y 28/44 del 19-03-2000 del inicio de la época seca. El área de estudio se sitúa en el traslape de estas dos imágenes (Figura III.2). Las imágenes fueron proporcionadas ya georreferenciadas por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), por lo tanto se desconoce los parámetros y procedimiento empleados. Se remuestreó la banda térmica a un tamaño de celda de 30 m, utilizando el método de muestreo del vecino más cercano. El esferoide corresponde a Clarke 1986, el datum a NAD27 (México) y la zona UTM a la 14.

En Bujaraloz se utilizaron tres imágenes Landsat ETM+ del 2000 (199/31) del 17 de marzo, 21 de junio y 8 de agosto. El área de estudio comprende la superficie abarcada por el mapa litológico de Salvany *et al.* (1996; Figuras III.2 y III.5) modificado posteriormente por el primer autor (comunicación personal). La georreferenciación se realizó con 80 puntos de control ubicados utilizando el mapa topográfico 1:50 000 (Servicio Geográfico del Ejército, Hojas 413, 1985 y 414, 1983), se usó un polinomio de segundo orden y con error menor a medio píxel. Se cambió el tamaño del píxel de 30 a 25 m (para facilitar la ubicación de puntos tanto en el mapa como en campo), incluida la banda del infrarrojo térmico, usando el método del vecino más cercano. Como esferoide y datum se utilizó el Internacional 1909 y como zona UTM la 30. Las características de las imágenes de las dos zonas se muestran en la Tabla III.3.

Preparación de las imágenes de satélite y obtención de las subescenas de trabajo.



Proceso de extracción de información.



Detalles de la clasificación supervisada por región de estudio

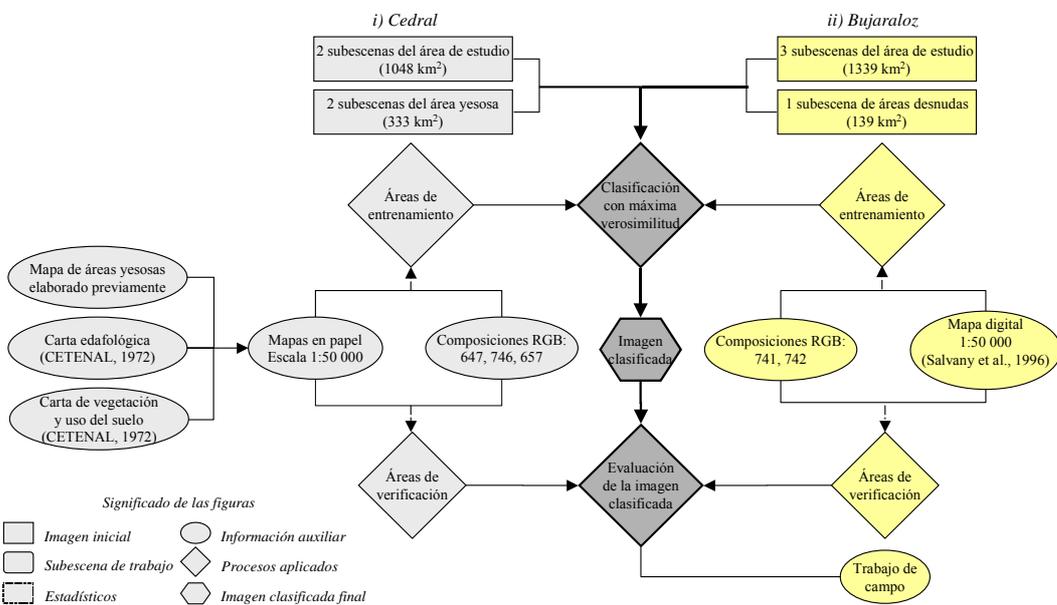


Figura III.6. Esquema de los procesos de preparación de las imágenes de trabajo y de la extracción de información.

Tabla III.3. Características de las imágenes utilizadas.

Dato	Imágenes de Cedral		Imágenes de Bujaraloz		
	28/43	28/44	199/31		
Escena	28/43	28/44	199/31		
Fecha	28-11-1999	19-03-2000	17-03-2000	21-06-2000	08-08-2000
Hora (LAT)	17:03:33	17:06:46	10:35:24	10:34:37	10:33:53
Distancia Tierra-Sol, D. Wm <sup>-2</sup>	1.02812	1.00691	1.0102	0.9675	0.9719
Elevación del sol, $\alpha$	39.4025	54.7295	42.118	64.002	57.4111
Azimut	153.19	127.6830	147.473	127.902	135.325
Ángulo cenital (90- $\alpha$ )	50.5975	35.2705	47.882	25.998	32.5889
COS del ángulo cenital	0.634764 <sup>a</sup>	0.816435	0.67066	0.89881	0.84255
ND <sub>k</sub> Mínimo <sup>b</sup> :					
ETM+1	38	53	57	88	72
ETM+2	21	32	39	63	52
ETM+3	14	26	29	49	37
ETM+4	12	12	16	20	14
ETM+5	9	13	10	17	11
ETM+7	7	11	8	11	9
(Lmin) $a_{0,k}$					
ETM+1	(A) -6.2				
ETM+2	(A) -6.4				
ETM+3	(A) -5.0				
ETM+4	(A) -5.1	(B) -5.1	(A) -5.1	(B) -5.1	(B) -5.1
ETM+5	(A) -1.0				
<b>ETM+6F1</b>	(A) 2.51	<b>(B) 0.0</b> <sup>d</sup>	<b>(B) 0.0</b> <sup>d</sup>	<b>(B) 0.0</b> <sup>d</sup>	<b>(B) 0.0</b> <sup>d</sup>
<b>ETM+6F2</b>	<b>(B) 0.8</b> <sup>d</sup>	(A) 3.2	(A) 3.2	(A) +3.2	(A) +3.2
ETM+7	(A) -0.35				
Radiancia a DN max (Lmax)					
ETM+1	191.6	191.6	191.6	191.6	191.6
ETM+2	196.5	196.5	196.5	196.5	196.5
ETM+3	152.9	152.9	152.9	152.9	152.9
ETM+4	241.1	157.4	157.4	241.1	241.1
ETM+5	47.57	31.06	31.06	31.06	31.06
<b>ETM+6F1</b>	14.72	<b>17.04</b> <sup>d</sup>	<b>17.04</b> <sup>d</sup>	<b>17.04</b> <sup>d</sup>	<b>17.04</b> <sup>d</sup>
<b>ETM+6F2</b>	<b>14.69</b> <sup>d</sup>	12.65	12.65	12.65	12.65
ETM+7	16.54	10.80	10.8	10.8	10.8
$a_{1,k}$ <sup>c</sup>					
ETM+1	0.775686	0.775686	0.775686	0.775686	0.775686
ETM+2	0.795686	0.795686	0.795686	0.795686	0.795686
ETM+3	0.61921	0.61921	0.61921	0.61921	0.61921
ETM+4	0.63725	0.96549	0.63725	0.96549	0.96549
ETM+5	0.12572	0.125725	0.125725	0.125725	0.125725
<b>ETM+6F1</b>	0.04788	<b>0.06682</b> <sup>d</sup>	<b>0.06682</b> <sup>d</sup>	<b>0.06682</b> <sup>d</sup>	<b>0.06682</b> <sup>d</sup>
<b>ETM+6F2</b>	<b>0.05447</b> <sup>d</sup>	0.03706	0.03706	0.03706	0.03706
ETM+7	0.14372	0.043725	0.043725	0.043725	0.043725

Continuación de la Tabla III.3.

Dato	Imágenes de Cedral		Imágenes de Bujaraloz		
Irradiancia solar, $E_0$ ( $Wm^{-2}\mu m^{-1}$ )					
ETM+1	1969	1969	1969	1969	1969
ETM+2	1840	1840	1840	1840	1840
ETM+3	1551	1551	1551	1551	1551
ETM+4	1044	1044	1044	1044	1044
ETM+5	225.7	225.7	225.7	225.7	225.7
ETM+7	82.07	82.07	82.07	82.07	82.07
ETM+8	1368	1368	1368	1368	1368
Ancho y centro de cada banda de las imágenes Landsat válido en las dos regiones					
	Ancho de banda, $\mu m$		Centro de banda, $\mu m$		
ETM+1	0.45-0.52		0.485		
ETM+2	0.52-0.60		0.56		
ETM+3	0.63-0.69		0.66		
ETM+4	0.76-0.90		0.83		
ETM+5	1,55-1,75		1.65		
ETM+6	10.4-12.5		11.45		
ETM+7	2.08-2.35		2.215		
ETM+8	0.50-0.90		0.70		

LAT = Local apparent time

ETM+6F1 y ETM+6F2. Son dos formas de proporcionar la banda térmica, correspondiente a ganancia alta (A) o baja (B) según fecha de imagen.

a)  $COS[(\pi/180)(\text{Ángulo cenital})]$ .

b) Nivel digital a restar para la corrección atmosférica (Chávez, 1988).

c)  $a_1=(L_{max}-L_{min})/255$ .

d) Valores usados para el cálculo de la temperatura.

**5.1.2. Corrección atmosférica y transformación de los ND a reflectancia, bandas 1-5, 7.** Una vez georreferenciadas y remuestreadas las imágenes, tanto de Cedral como de Bujaraloz, las bandas 1 a 5 y la 7 se corrigieron atmosféricamente restándoles el ND mínimo (Chávez, 1988). Al mismo tiempo se transformaban los ND a reflectancia (Chuvieco, 2002) utilizando los datos de la Tabla III.3 y la siguiente fórmula:

$$\text{Reflectancia, \%} = \frac{[a_{1,k}(ND_k - ND_k \text{ mínimo}) + a_{0,k}] \pi D}{E_{o,k} \cdot \text{Coseno del ángulo cenital}} \times 100$$

$a_{1,k} = (L_{max}-L_{min})/255$ ;  $a_{0,k} = (L_{min})$ ;  $E_{o,k}$  = Irradiancia solar espectral, energía recibida por área y tiempo en la parte superior de la atmósfera;  $D$  = Factor corrector de la distancia Tierra-Sol;  $ND_k$  mínimo = valor de nivel digital que se restó para la corrección atmosférica;  $k$  = corresponde a la banda en cuestión; **Ángulo cenital** =  $90-\alpha$ ;  $\alpha$  = Elevación del sol.

**5.1.3. La transformación del ND de la banda 6 a temperatura superficial.** Para pasar los valores de ND de la banda ETM+6 (IRt) a valores de temperatura superficial, °C, se siguió el método de Sospedra *et al.*, (1998). Para ello se calculó la emisividad de dos formas: Forma I) cálculo de la emisividad de acuerdo a Van de Griend y Owe, (1993) y forma II) teniendo en cuenta las adecuaciones propuestas por Valor y Caselles (1996). En el satélite Landsat se obtienen las bandas ya sea en ganancia baja o alta, con base a las condiciones de brillantez esperada de la escena según época del año y paisaje. Así, la imagen es en modo ganancia baja cuando la superficie es muy brillante evitando la saturación y ganancia alta cuando la brillantez es baja. En Landsat 7 a la banda 6 la proporcionan en ambos formatos. Los datos de las imágenes que se utilizaron en la transformación se muestran en la Tabla III.3. Para las imágenes de Cedral se utilizó la forma I y para las imágenes de Bujaraloz la II. En el apartado 6.1 se explica la razón de ello.

**Forma I.**

$$1. \text{ Radiancia} = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{255} ND_k + L_{\min} = a_{ik} ND_k + a_{0k}$$

$$2. \text{ Brillantez o temperatura de brillo} = \frac{K_2}{\ln \left[ \frac{K_1}{\text{Radiancia}} + 1 \right]}$$

Donde:  $K_1 = 666.09$  y  $K_2 = 1282.71$

ln = Logaritmo natural

$$3. \text{ Emisividad (Van de Griend y Owe, 1993), } \epsilon = 1.009 + 0.047 \times \text{LnNDVI}$$

$$4. \text{ (Inverso de la ley de Planck) Temperatura, } ^\circ\text{C} = \left[ \frac{\text{Brillantez}^4}{\text{Emisividad}} \right]^{0.25} - 273$$

**Forma II.** Esta segunda forma se diferencia de la primera en los cálculos de los puntos 3, 4 y 5.

$$1. \text{ Radiancia} = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{255} ND_k + L_{\min} = a_{ik} ND + a_{0k}$$

$$2. \text{ Brillantez o temperatura de brillo} = \frac{K_2}{\ln \left[ \frac{K_1}{\text{Radiancia}} + 1 \right]}$$

Donde:  $K_1 = 666.09$  y  $K_2 = 1282.71$

$$3. \text{ Normalización del NDVI, } N = (\text{NDVI} - \text{NDVImín}) / (\text{NDVImáx} - \text{NDVImín})$$

$$4. \text{ Factor o fracción vegetación, } Fv = N^2$$

$$5. \text{ Emisividad, } \epsilon = Fv \times \epsilon_v + (1 - Fv) \times \epsilon_s = Fv * (0.98) + (1 - Fv) * (0.93).$$

Donde: 0.98 es la emisividad promedio de la vegetación,  $\epsilon_v$ , y 0.93 la del suelo,  $\epsilon_s$  (Lillesand y Kiefer, 1996)

$$6. \text{ Temperatura, } ^\circ\text{C} = \left[ \frac{\text{Brillantez}^4}{\text{Emisividad}} \right]^{0.25} - 273$$

#### 5.1.4. Recortes y máscara.

En las dos imágenes de Cedral se realizaron tres recortes. El primero consistió en la subescena de 5894 km<sup>2</sup> en la imagen 28/43 y de 10055 km<sup>2</sup> en la imagen 28/44, en la que está incluida el área yesosa delimitada en el Mapa 4 obtenido en el Capítulo II. A estas subescenas se aplicaron los tratamientos descritos en los apartados 5.1.1 a 5.1.3. Una vez transformadas las bandas 1-5 y 7 a reflectancia y la banda 6 a temperatura superficial, se hizo un segundo recorte de 1048 km<sup>2</sup>, el cual comprende el área común a las dos imágenes y constituye el área de trabajo completa, que incluye superficie con y sin yeso. Para realizar el estudio en el área yesosa se hizo un tercer recorte, eliminando la parte que no contenía yeso. La selección del área yesosa (333 km<sup>2</sup>) se hizo directamente en pantalla con base al Mapa II.4 del Capítulo II. A las subescenas del área común completa y de la yesosa se les aplicaron los procesos de extracción temática que se describen en el apartado 5.2.

En Bujaraloz los procesos anteriores se aplicaron a una subescena de 1680 km<sup>2</sup> que contiene el área de interés. Posteriormente en éste se recortó una subescena que abarca el área estudiada por Salvany *et al.* (1996). Además, como se quería aplicar el método en áreas sin vegetación o donde ésta fuera escasa, no únicamente en áreas yesosas, se

hizo una máscara con el índice de vegetación NDVI. Solamente se trabajó con la imagen de agosto por corresponder al mes más seco y por lo tanto con más suelo descubierto. Se probaron varios valores de NDVI sin embargo al final se consideró un  $NDVI = 0.15$ , ya que con un NDVI menor se eliminaba el área yesosa de interés y con uno mayor permanecía mucha superficie con vegetación. A la última subescena y al área sin vegetación se les aplicaron los procesos que se detallan en el punto 5.2.

**5.2. Extracción de información temática.** Consistió en los procesos de análisis visual y digital para discriminar las áreas yesosas. La interpretación visual se desarrolló en las bandas en valores de reflectancia o en nuevas bandas generadas mediante transformaciones, tales como albedo, Tasseled cap, IHS, análisis de componentes principales e índice de yeso. La clasificación digital se hizo solamente con las imágenes originales (Figura III.6), se descartaron las generadas con las transformaciones Albedo, IHS, TC, ACP e Índice de yeso debido a que visualmente en ellas las áreas yesosas no se discriminan mejor que en las bandas originales.

El análisis de las imágenes de Cedral se hizo en dos partes, la primera incluyó toda la subescena (Figura III.2) y después se aplicó el mismo procedimiento en el áreas yesosa. En Bujaraloz se aplicó en la subescena completa y posteriormente en la máscara obtenida con un  $NDVI = 0.15$  para la imagen de agosto. El estudio en Bujaraloz fue útil para verificar si se generaban los mismos resultados en otra área yesosa.

**5.2.1. Extracción de información mediante análisis visual.** La interpretación o análisis visual fue la primera estrategia de discriminación de suelos o litologías yesosas. Mediante este análisis se obtiene información cualitativa de las imágenes de satélite porque incorpora criterios complejos ausentes en la clasificación digital (supervisada o no), tal como la textura, la sombra, etc. o sencillos como el brillo y el tono o color (Chuvieco, 2002). Los dos últimos, según ese autor, son los criterios más elementales y son los que caracterizan a una cubierta.

Se interpretó directamente en la pantalla de la computadora y solamente en el área de estudio completa de ambas regiones. En Cedral se hicieron comparaciones con cartografía en papel, utilizando el mapa de superficies yesosas obtenido en el capítulo anterior, la carta edafológica y la carta de vegetación y uso del suelo escala 1:50 000

(CETENAL, 1972). En Bujaraloz se comparó con el mapa litológico (Salvany *et al.*, 1996) escala 1:50 000 y digitizado. El análisis visual se empezó con las bandas en valores de reflectancia y de temperatura superficial (IRT), banda por banda o en composición falso color. Posteriormente se hizo el análisis visual en las bandas o imágenes resultantes de las transformaciones aplicadas para tratar de incrementar el contraste espectral y que facilitaran la discriminación de las áreas yesosas, tales como albedo, Tasseled cap, IHS (intensidad, tono, saturación), análisis de componentes principales, e índice de yeso.

Las transformaciones anteriores no son las únicas posibles, también es factible utilizar los cocientes o el índice de brillo propuesto por Escadafal y Bacha (1996), entre otros. Sin embargo, se emplearon los que se consideró que podían dar buenos resultados en la discriminación de áreas yesosas. Se siguió el mismo análisis tanto en Cedral como en Bujaraloz y cuando no es así en su momento se hacen las aclaraciones pertinentes.

#### **5.2.1.1. Análisis visual de las bandas originales.**

- a1). Por banda.
- a2). Composición en falso color (CFC) por imagen.
- a3). Composición en falso color multitemporal por banda es decir utilizando la misma banda de las tres imágenes, o diferente banda. Esto solamente se hizo en Bujaraloz porque se tenían imágenes de tres fechas, y para mejorar los resultados visuales, ya que la banda térmica fue menos útil que en Cedral. En Cedral al contar solamente con dos imágenes no se pudo efectuar este análisis.

#### **5.2.1.2. Análisis visual en las transformaciones de la imagen.**

- A). **Albedo.** Se calculó con la ecuación  $(0.322*ETM+3) + (0.725*ETM+4)$  mencionada por Martínez-Ríos y Monger (2002). Sus resultados se analizaron visualmente.
- B). **Transformación IHS (Intensidad, Tono, Saturación).** Sus resultados se analizaron visualmente.
- C). **Transformación Tasseled cap, TC.** Se usaron los coeficientes reportados por Chuvieco (2002) para datos del satélite Landsat 5. Sus resultados se analizaron visualmente. En el caso de Cedral, el índice verdor se utiliza para hacer subdivisiones de las clases temáticas agricultura y vegetación. También se hace un análisis general, en ambas regiones, para hacer comparaciones entre las clases

temáticas relacionadas con el yeso e indagar si el yeso se diferencia en estos índices. En Bujaraloz además se compara de manera general el índice brillo con el “*value*” (de la tabla de colores Munsell) de muestras de suelo de las Unidades Litológicas que se confunden con el yeso, lutita verde-caliza, lutita verde-yeso, lutita roja y caliza.

**D). Análisis de componentes principales:**

- d1). De las bandas con y sin la banda térmica. Sus resultados se analizaron visualmente.
- d2). Aplicado en dos grupos de bandas. Uno con las bandas 1, 2, 3 y el otro con las bandas 5, 7. Sus resultados se analizaron visualmente y la CFC se formó con la primera o segunda componente principal de cada grupo y con la banda 4 no incluida en el análisis.
- d3). Dispersograma. Para tratar de detectar píxeles puros o “*endmember*” e indagar si las CP analizadas de esta forma son de utilidad en la discriminación de las áreas yesosas, se graficaron dos de las tres primeras componentes principales obtenidas con y sin la banda térmica. En Cedral la correspondencia de los píxeles con mayor pureza respecto a alguna clase de ocupación del suelo se hizo cotejando dichos píxeles con las cartas (impresas) edafológica, geológica y de vegetación y de uso del suelo (CETENAL, 1972) a escala 1:50 000. En Bujaraloz se vio su correspondencia con alguna litología según el mapa litológico de Salvany *et al.* (1996) o con áreas húmedas o con cultivos. Los dispersogramas se obtuvieron con el software ILWIS 3.0 Academic.

**E). Índice de yeso.**  $IY = (0.147*TM1) - (0.163*TM4) + (0.536*TM5) - (0.815*TM7)$ , obtenido por Neville *et al.* (2000). Debido a que no explican con detalle el procedimiento usado, no fue posible generar los coeficientes para las imágenes de Cedral y de Bujaraloz, por lo que se usaron los valores reportados por los anteriores autores. La imagen resultante se comparó con las cartas edafológicas y de vegetación y uso del suelo escala 1:50 000 (CETENAL, 1972) en Cedral y en Bujaraloz con el mapa litológico de Salvany *et al.* (1996). Tanto en Cedral como en Bujaraloz se seleccionaron píxeles de las clases mejor discriminadas obteniéndose los valores de reflectancia y de temperatura superficial, estos datos se graficaron contra los del índice de yeso para saber si existe relación entre ambos resultados.

**5.2.2. Extracción de información temática mediante clasificación supervisada de las imágenes Landsat ETM+.** Se decidió utilizar el término “clasificación supervisada” porque, en ambas regiones, se hace uso de mapas como información de referencia ya que su obtención conlleva tanto trabajo de campo como de laboratorio. Otros autores han utilizado mapas como información de referencia para la clasificación (Panah y Goossens, 2000) o para la verificación de resultados (Younis, 1993; Koch, 2000).

En Cedral la clasificación supervisada se hizo primero en el área yesosa, procesando por separado a cada subescena utilizando varias combinaciones de bandas, considerando mínimo tres y máximo siete bandas. Primero se trabajó con las tres bandas que dieron mejores resultados en la interpretación visual, luego con otras combinaciones y número de bandas. La clasificación digital de la subescena completa se inició con las siete bandas y después se fueron eliminando las que obtenían más confusión entre clases, considerando la Divergencia transformada (DT) y la distancia de Jeffries – Matusita (JM). Los resultados de las primeras clasificaciones se comparaban visualmente con los mapas de área yesosa y de CETENAL. En las que guardaban más concordancia imagen-mapa se componía la matriz de confusión, eligiendo las de mejores índices de fiabilidad (FG y  $\kappa$ ), resultando ser las clasificaciones con 7 y 6 bandas sin la térmica, éstas son las que se presentan en el apartado 6 Resultados y discusión.

En Bujaraloz la clasificación supervisada se hizo primero en la subescena completa, al igual que en Cedral se trabajó con varias combinaciones de bandas, desde 3 (mejores composiciones RGB) a 7 por imagen. Se empezó con las siete bandas, para posteriormente ir disminuyendo el número de ellas según su participación en la separación espectral de cada clase, considerando los valores de DT y JM. Además en cada clasificación se sobreponía el mapa litológico (Salvany *et al.*, 1996) digitizado, eligiendo las que guardaban mejor concordancia con él, para luego componer la matriz de confusión. Las mejores clasificaciones se tuvieron con 21 y 18 bandas (sin las bandas térmicas), son las que se detallan en el apartado de Resultados, haciendo comentarios sobre clasificaciones con o sin otras bandas. La clasificación supervisada se hizo con el método de asignación por máxima verosimilitud tomando en cuenta una probabilidad del 99 %.

El proceso anterior se hizo para cada imagen e incluyendo bandas de dos o de las tres imágenes, de esta forma se hicieron clasificaciones considerando desde 9 a 21 bandas. Además, las 12 clases litológicas se agruparon con base a la litología dominante hasta mínimo en seis. Así se hicieron clasificaciones con 14, 12, 10 y 8 clases temáticas, incluyendo las clases regadío y áreas húmedas. En resultados y discusión se presentan los resultados obtenidos en la clasificación considerando las 21 bandas con 14 y 8 clases temáticas; así como los resultados obtenidos clasificando con 18 bandas (sin las bandas térmicas) y 14 clases temáticas; haciéndose mención a la clasificación con 12 clases o con otras bandas. Por último, la máscara (obtenida con base al NDVI) de las áreas desnudas o sin vegetación de la imagen de agosto se clasificó con siete y con seis bandas, incluyendo 8 ó 6 clases. El proceso seguido para la clasificación supervisada se detalla en los siguientes párrafos.

La clasificación supervisada de las imágenes de Cedral se inició con la toma de las áreas de entrenamiento. Estas suponían en promedio una superficie del 2.7 % de la subescena del área yesosa y 2.15 % subescena completa de la imagen 28/44, y 3.8 % para el área yesosa y 1.15 % del área completa de la imagen 28/43. Así, en Cedral se tomaron sobre las composiciones falso color ETM+647, 746, 675 y 157 en las que se discrimina mejor el área yesosa, y en sí las ocupaciones. Para la ubicación de dichas áreas se usó como información de referencia las cartas edafológicas y de vegetación y uso del suelo escala 1:50 000 hojas F14-A-14, F14-A-23 y F14-A-25 (CETENAL, 1972) y en las cartas estatales de suelos y vegetación y uso actual a escala 1:1000 000 (INEGI, 1983). También se usaron los resultados de la verificación en campo de la presencia y profundidad a la que se encuentra el yeso (Capítulo II).

Las clases temáticas de Cedral (Tabla III.4) se definieron con base a la carta de vegetación y uso del suelo (CETENAL, 1972) escala 1:50 000, de esta forma se distribuyeron en áreas con actividad agrícola y con vegetación natural. Las divisiones creadas en el área agrícola (A) y en el Matorral desértico (MD, clase B1) y clases C se basaron en el índice verdor de la transformación Tasseled cap (Chuvieco, 2002) de cada grupo de clases. Como información complementaria se utilizó la carta edafológica escala 1:50 000 (CETENAL, 1972) y a escala 1:1000 000 (INEGI, 1983).

La primera (A11) corresponde a agricultura de temporal (secano) con problemas de erosión, las cinco siguientes tanto a agricultura de temporal como de riego, y las nueve últimas a vegetación natural. El regadío se delimitó solamente a partir de las imágenes de satélite, dado que los mapas del área de estudio son anteriores a la puesta en regadío. Para definir las clases finales se utilizó como criterio la separabilidad espectral considerando la Divergencia transformada (DT) y la distancia Jeffries Matusita (JM), tratando de que presentaran la máxima separación posible, 2000 para DT y 1414.21 para JM, y que la clasificación arrojara resultados acordes a la información de referencia.

Tabla III.4. Clases temáticas establecidas (incluyendo las presentes solamente en la subescena completa, C) y su correspondencia con la vegetación y los suelos según los mapas CETENAL (1972) e INEGI (1983) en el área agrícola y vegetación natural en ellos delimitadas, Cedral.

	Clase temática	Cobertura	Suelo
<b>ÁREA AGRÍCOLA</b>			
Sin cultivo	A11 Sin verdor	At, Ar, E	Xh, Ie, Zo, Fpy, Fpc
	A12 Verdor muy bajo	At, Pg	Xy, Fpy
	A13 Verdor bajo	At	Xk, Xy, Rc, Ie, Fpy, Fpc
Con cultivo	A21 Verdor medio	At, Ar	Xh, Xy, Zo, Fpy, ms, n
	A22 Verdor alto	Ar, At	Xy, Xk, Xh, Fpy
	A23 Verdor muy alto	Ar	Xy, Xh, Xk, Fpy, Fpc
<b>VEGETACIÓN NATURAL</b>			
MD	B11 Sin verdor	Lt	Ie, Xy, Xk, Fpy, ms
	B12 Verdor bajo	Lt, Yu	Xk, Xh, Xy, Yy, Fpy, Fpc
	B13 Verdor medio	Hp, Cp	Ie, Rc, Xk, Fpc, Fpy
	B14 Verdor alto	Pl, Lt, Yu, Ac	Xy, Xh, Xk, Fpy, Fpc
Pg	B2	Bc, Mp, Ac, Su, Lt	Xy, Fpy
Mz	B3	Pl, Ac, Op	Xy, Xh, Fpy
CR-Iz-MD	C1 Verdor** bajo	Lt, Pl, Ag, Al, Op, Yu	Ie, Xk, Rc, Fpc
	C2 Verdor medio	Ag, Ml, Al, Op, Lt, Yu, Hg, Ea	Ie, Fpc
	C3* Sin verdor	Ag, Lt, Ml, Al, Op, Hg, Ea, Yu	Ie, Xk, Fpc

\* La litología superficial corresponde principalmente a lutitas.

\*\* Con base a la imagen 28/43.

**Cobertura:** *Acacia* sp. (Ac), *Agave* sp (Ag), *Aechtia glomerata* (Al), Agricultura de regadío (Ar) y de temporal (At), *Atriplex canescens* (Ac), *Bouteloua chasei* (Bc), *Celtis pallida* (Cp), Matorral Crasirosulifolio espinoso (CR), *Euphorbia antisyphilitica* (Ea), Erosión (E), *Helietta parviflora* (Hp), Izotal (Iz), *Larrea tridentata* (Lt), Matorral desértico (MD), *Mimosa leucaenoides* (Ml), *Muhlenbergia purpusii* (Mp), *Mezquital* (Mz), *Opuntia* sp. (Op); Pastizal gipsófilo (Pg), *Prosopis laevigata* (Pl), *Suaeda* sp. (Su), *Yucca* sp (Yu).

**Suelos:** Litosol éutrico (Ie); Regosol cálcico (Rc); Solonchak órtico (Zo); Xerosol cálcico (Xk), gipsico (Xy) y háptico (Xh); Yermosol gipsico (Yy); Fases Medianamente salino (ms), nátrico (n), Petrogipsica (Fpy) y Petrocálcica (Fpc).

En Bujaraloz las áreas de entrenamiento supusieron una superficie promedio del 3.25 %, del 2.95 % y del 2.48 % de la imagen para las clasificaciones con 14, 12 y 8 clases temáticas, respectivamente. Las áreas de entrenamiento se tomaron utilizando las composiciones RGB 741 y 742, y superponiendo a la imagen el mapa litológico de Salvany *et al.* (1996, Figura III.5), digitizado con ArcInfo en la Unidad de Suelos y Riegos, Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria, Gobierno de Aragón. En las clases formadas (Tabla III.5) se incluyeron las 12 Unidades Litológicas reportadas por Salvany *et al.* (1996), el regadío y las áreas húmedas. Las primeras 12 clases de la Tabla III.5 se consideraron por separado o agrupándolas según la roca dominante, generándose un mínimo de seis clases. De esta forma el número máximo de clases temáticas fue de 14 y el mínimo de 8 (Tabla III.5).

Tabla III.5. Clases de partida (las primeras 12 de la primera columna son las Unidades Litológicas de Salvany *et al.*, 1996), clases temáticas finales y las agrupadas, Bujaraloz.

<b>Clases de partida</b>	<b>Clases temáticas</b>	<b>Clases temáticas agrupadas</b>
Lutitas verdes, yesos y calizas	Lutita verde-yeso	Lutita verde-yeso
Lutitas verdes, calizas y yesos	Lutita verde-caliza	Lutita verde-caliza
Calizas, margocalizas y lutitas	Margocaliza	Margocaliza
Lutitas rojas, areniscas, calizas y yeso	Lutita-arenisca	
Lutitas rojizas y calizas	Lutita rojiza	Lutita roja-II
Lutitas rojas, yesos, calizas y areniscas	Lutita roja-yeso	
Lutitas rojas, areniscas y calizas	Lutita roja	
Calizas, lutitas verdes y rojas	Caliza-lutita	Caliza-II
Calizas	Caliza	
Yeso, caliza y lutita	Yeso	Yeso-II
Yeso, caliza y lutita (depresiones)	Yeso depresión	
Aluviones (limos yesíferos y arcillas)	Aluvión	<i>Regadío</i>
<i>Regadío</i>	<i>Regadío</i>	
<i>Áreas húmedas</i>	<i>Áreas húmedas</i>	<i>Áreas húmedas</i>

En Bujaraloz se usó como información de referencia para tomar las áreas de entrenamiento y de verificación el mapa de Salvany *et al.*, (1996) y no los geológicos de la serie MAGNA (Ramírez, 2003, H-413; Solà y Costa, 2003, H-414) debido a que estos mapas tienen más clases (la hoja 413 tiene 30 unidades litológicas y la 414 tiene 24), y no manejan la misma nomenclatura de las unidades cartográficas en la colindancia, aunque coinciden los linderos entre unidades. Por ejemplo, en la hoja H-413 se tienen calizas tableadas y en la H-414 pasa a calizas y margas; en otras áreas en la hoja H-413 son calizas tableadas y arcillas anaranjadas y en la H-414 son calizas y margas grises.

Además existe concordancia entre el mapa de Salvany *et al.* (1996) y el mapa geológico en varias de las unidades cartográficas (con mayor detalle en el mapa geológico): la caliza concuerda con calizas y margas; lutita verde-caliza-yeso con margas grises, yesos nodulares y calizas; lutitas verdes-yeso-caliza con yesos nodulares, tabulares y margas yesíferas grises e intercalaciones de yeso; lutita roja-arenisca-caliza con arcillas y yesos rojos; caliza-margocaliza con margas y calcisistitas y yesos verdes, etc. Además, la publicación de los mapas geológicos fue posterior a la digitización del de Salvany *et al.* (1996).

Con el propósito de conocer el comportamiento de las coberturas en las áreas yesosas sin interferencia de otros sustratos, se aplicó el proceso de clasificación supervisada primero en el área yesosa de Cedral. Para indagar el grado de discriminación de las coberturas en áreas yesosas frente a otras, se continuó con el procesamiento en el área total de Cedral, incluyendo superficies con o sin yeso. Posteriormente se hizo la clasificación digital en las imágenes de Bujaraloz, y para averiguar si el yeso se discriminaba de otras litologías presentes se clasificó primero la subescena completa. En último lugar se clasificó la imagen de agosto después de eliminar la cubierta vegetal, con ello se investigó la separabilidad de la litología de yeso sin la interferencia de la cubierta vegetal. El mismo orden se guarda en el apartado de resultados y discusión sobre la clasificación supervisada.

**5.3. Evaluación de los mapas obtenidos.** Los mapas tanto de Cedral como de Bujaraloz se evaluaron con matriz de confusión usando áreas de verificación no utilizadas para la clasificación y ubicadas en la misma forma que las áreas de entrenamiento. En Cedral, en promedio comprendieron una superficie del 2.54 % de la subescena del área yesosa y 1.96 % en la subescena completa de la imagen 28/44, y superficie del 3.86 % para la subescena del áreas yesosa y 1.15 % del área completa para las imagen 28/43.

En Bujaraloz, la superficie promedio de las áreas de verificación representaron el 2.85 %, el 2.82 % y el 2.44 % para la imagen para las clasificaciones con 14, 12 y 8 clases temáticas, respectivamente. Como parámetros de fiabilidad se utilizaron los estadísticos fiabilidad global, índice kappa ( $\kappa$ ), exactitud de identificación y exactitud cartográfica. Los últimos dos también son conocidos como exactitud del usuario y exactitud del productor, respectivamente. En el presente trabajo se utilizan los términos exactitud de identificación y exactitud cartográfica porque se consideran más fáciles de comprender. Para todos los procesos, cálculos, clasificación espectral, etc. se utilizó el software ERDAS 8.4. La edición de los mapas se hizo con ArcView 3.1.

En los mapas de Bujaraloz también se verificó en campo la unidad cartográfica yeso, debido a que es la litología de interés. Esta comprobación consistió en la selección, previa a la salida al campo, de sitios de muestreo (anotando las coordenadas UTM) en áreas donde según al mapa de Salvany *et al.* (1996) escala 1:50 000 debió detectarse yeso en la clasificación espectral y no fue así. En campo los sitios se localizaron mediante un GPS (Garmin) y mapas topográficos escala 1:25 000 (IGN, 2002). En cada sitio se tomaron muestras del suelo y costra, en caso de existir.

A las muestras de suelo colectadas se les determinó el color con la carta de colores Munsell. Además, se tomaron datos de la litología superficial, presencia de sales y ocupación actual (Anexo). También se verificaron áreas identificadas en la imagen como yeso y que estaban fuera de la unidad cartográfica yeso. Asimismo se incluyeron sitios correspondientes a litologías con las que se confundió el yeso (Lutita verde-Yeso, Lutita verde-Caliza, Caliza, Lutita roja, y Lutita rojiza).

En Bujaraloz también fue necesario comprobar la cartografía en algunas depresiones o fondos de saladas, debido a que se cartografiaron como yeso. En estas áreas se encontró tapiz algal con revestimiento de color más blanco que 10YR 8/1, y para conocer la composición del revestimiento se muestreó el material encontrado en Valdefrancín y se analizó en el Laboratorio de Microscopía Electrónica de la Universidad de Lleida.

Los análisis y su interpretación las efectuó el Dr. Jacek Wierzchos. Para ello una muestra fresca de tapiz algal se secó con aire a 60 °C durante 48 horas y se revistió con carbón, posteriormente se estudió con un microscopio electrónico de barrido (MEB) DSM 940A Zeiss (Germany) equipado con un detector de 4-diodos de electrones retrodispersados (BSE).

Los análisis cualitativos y semicuantitativos se realizaron con espectrómetro microanalítico Link ISIS de dispersión de energía de los rayos X (EDS) Oxford Instruments, Oxford, UK. Las condiciones de operación del microscopio fueron como sigue: potencial de aceleración de 15 kV, corriente eléctrica  $10^{-8}$  A, distancia de trabajo (WD) de 8 mm para la adquisición de imágenes, y 25 mm para el microanálisis. La visualización de la imagen de los depósitos de yeso sobre el tapiz algal y el análisis cualitativos y semicuantitativos se realizaron simultáneamente.

**5.4. Suavizado.** Con el fin de mejorar visualmente la calidad de edición de los mapas finales de ambas regiones se les aplicó un suavizado, eliminándose los píxeles inmersos dentro de otras unidades cartográficas. Por tratarse de una mejora de la edición y no con fines de clasificación o de evaluación de los mapas, el suavizado se aplicó a las imágenes después de la verificación y de haber obtenido los parámetros de fiabilidad. Para ello se utilizó la matriz 3x3 y la función de la moda.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados y su discusión se hacen primero para Cedral y posteriormente para Bujaraloz. A manera de preámbulo y en forma general, en ambas regiones las bandas 5, 6 y 7 fueron las más útiles en la discriminación de terrenos yesosos. Los resultados del análisis visual con las bandas originales no fueron superados por ninguna de las transformaciones de los datos originales, el albedo, ACP, transformaciones IHS y TC e índice de yeso (Tabla III.6). La clasificación supervisada dio mejores resultados en Cedral que en Bujaraloz, tanto con o sin la banda térmica, y esta última fue de más utilidad en Cedral. En la segunda región la clasificación multitemporal fue con la que se discriminó mejor la litología yesosa (Tabla III.6).

Tabla III.6. Utilidad cualitativa de las bandas, sus transformaciones y procesos de análisis visual en la discriminación de áreas yesosas por zona de estudio.

<b>Banda o transformación</b>	<b>Cedral</b>	<b>Bujaraloz</b>
Banda 1	Poco útil	Muy poco útil
Banda 2	Muy poco útil	Muy poco útil
Banda 3	Medianamente útil	No útil
Banda 4	Medianamente útil	Poco útil
Banda 5	Útil	Útil
Banda 6 (temperatura superficial, °C)	Muy útil	Medianamente útil
Banda 7	Útil	Útil
Albedo	Poco útil	Poco útil
CFC	Útil	Útil
IHS	Medianamente útil	Medianamente útil
TC	Medianamente útil	Medianamente útil
ACP_Con 6 bandas, sin el IRt	Poco útil	Poco útil
ACP_En grupos de bandas 1-3 y 5-7	Poco útil	Poco útil
ACP_Dispersograma	Muy poco útil	Muy poco útil
Índice de yeso	Poco útil	Poco útil
Clasificación espectral por imagen	Muy útil	Útil
Clasificación espectral multitemporal	No se realizó	Muy útil

**6.1. La transformación del ND del IRt a temperatura superficial.** En este apartado se describen los resultados de la transformación, tanto en Cedral como en Bujaraloz.

Para Cedral la Tabla III.7 indica unas temperaturas en la imagen 28/43 bastante bajas cuando se usa el procedimiento I. Con la forma II en la imagen 28/43 el valor máximo es de 47 °C y la media 39.3 °C; es decir son 9 y 12 °C, respectivamente, mayores a los tenidos con la forma I. La temperatura así calculada se aleja más que los de los otros autores para áreas próximas. Así, al norte del Desierto Chihuahuense (La Jornada del Muerto, Nuevo México, USA) con vegetación de pasto, mezquite y suelo desnudo, para el 30 de septiembre a la 10:30 horas, Schmutge *et al.* (2002) reportan temperaturas de campo mayores a 52 °C y media de unos 44 °C en pasto y mayores a 50 °C y media aproximada a 42 °C en suelo desnudo. Para el sur de La Gran Planicie, USA, Czajkowski *et al.* (2001) en áreas con cubierta vegetal del 40 % reportan temperaturas de superficie tomadas en campo cercanas a los 60 °C. Aunque para el área de estudio de Cedral no se tienen datos de la temperatura de la superficie tomadas en campo cabría la posibilidad de que los valores tenidos con la forma I (imagen 28/43) y forma II (imagen 28/44) se encuentren menos alejados de la temperatura que podría existir (Tabla III.7).

Tabla III.7. Resultados de la aplicación de las dos formas (I y II) de transformación del ND del IRt a temperatura superficial, °C.

Valor	Imágenes de Cedral					
	I-28/43		I-28/44			
	I	II	I		II	
Mínimo	1.0	17.0	20.0		22.0	
Máximo	38.0	47.0	50.0		50.0	
Medio	27.8	39.3	44.3		43.9	
Ds	4.3	3.5	3.3		2.9	
	Imágenes de Bujaraloz					
	Marzo I	Marzo II	Junio I	Junio II	Agosto I	Agosto II
	ETM+6-F1					
Mínimo	10.0	13.0	14.0	11.0	21.0	23.0
Máximo	32.0	32.0	44.0	41.0	49.0	47.0
Medio	22.9	24.3	32.9	33.6	38.7	39.7
Ds	2.9	2.2	3.8	2.8	5.3	4.2
	ETM+6-F2					
	Marzo I	Marzo II	Junio I	Junio II	Agosto I	Agosto II
	ETM+6-F2					
Mínimo	35.0	13.0	38.0	11.0	21.0	23.0
Máximo	64.0	32.0	80.0	42.0	50.0	47.0
Medio	52.7	24.3	66.8	33.6	38.3	39.8
Ds	3.8	2.3	5.0	2.8	5.3	4.3

Ds: desviación estándar

En la transformación del ND a temperatura superficial pueden interferir diversos factores. Por ejemplo, los cambios en la emisividad ( $\epsilon$ ) puede ser una fuente de error importante en el cálculo de la temperatura superficial (Van de Griend y Owe, 1993; Valor y Caselles, 1996), un error del 1 % en la  $\epsilon$  puede originar un error de 0.75 K en la temperatura superficial (Van de Griend y Owe, 1993). La  $\epsilon$  puede variar por diferencias en la estructura del suelo, composición del suelo, materia orgánica, contenido de humedad y cubierta vegetal. Cuando no existen datos de la  $\epsilon$  en campo y solamente se tienen datos de satélite el error en la  $\epsilon$  puede ser del 0.5 % a 2 % (Valor y Caselles, 1996).

La vegetación interfiere más en la  $\epsilon$  cuando el área con vegetación es menor al tamaño del píxel. La humedad de la atmósfera (en el intervalo de 8-14 m, Van de Griend y Owe, 1993) y el polvo también pueden afectar el cálculo de la temperatura superficial. La niebla es la que interfiere más, la diferencia puede ser de hasta de 10 °C (Judith Ramos, comunicación personal, 2004). En ninguna de las imágenes de Cedral ni de las de Bujaraloz, hay nubes o niebla, por lo que se descarta este problema. Además de estar presenta afectaría por igual a las dos formas (I y II) de transformar el IRT a temperatura superficial. Sin embargo ante la carencia de datos meteorológicos, en ambas regiones de estudio, no se saben las condiciones atmosféricas y que serían de ayuda para explicar los resultados.

La imagen 28/43 de Cedral presentó bandas de píxeles anómalos y que no se pudieron corregir por tener orientación diagonal, lo cual puede afectar los resultados. También es posible que el valor de la ganancia utilizada afecte los resultados de la transformación de ND a temperatura. En la imagen 28/43 se utilizó un valor de ganancia diferente (Tabla III.3). Los píxeles anómalos también pueden interferir. Sin embargo, el efecto tanto de la ganancia como de las bandas de píxeles sería igual en las dos formas de transformación.

La forma II (modificación de I) para transformar los ND de la banda térmica a temperatura superficial fue propuesta Valor y Caselles (1996) para tratar de tener valores de temperatura superficial más cercanos a la realidad. La modificación está en el uso del factor o fracción vegetación ( $F_v$ ), para lo cual se normaliza el NDVI a partir de

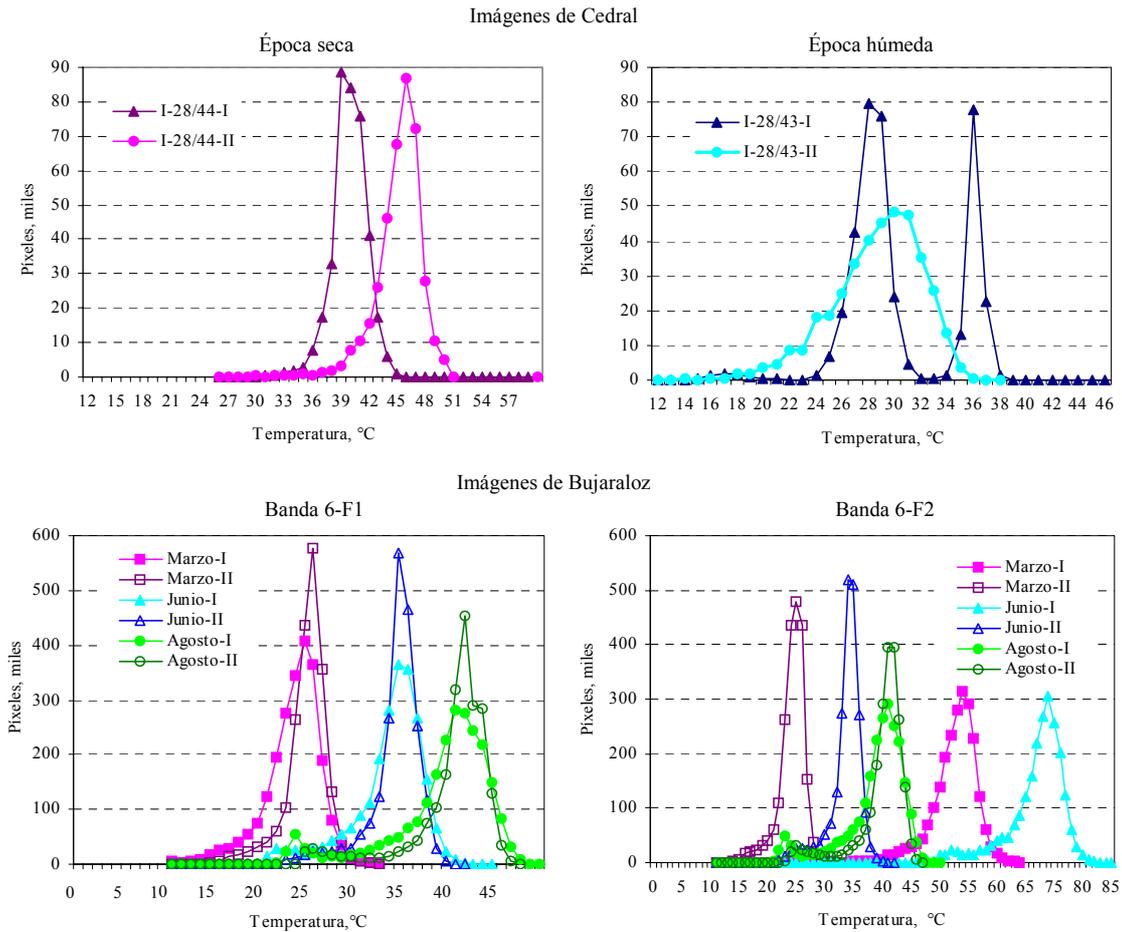
sus valores máximos y mínimos en función del suelo y vegetación (Tabla III.8). Para los cálculos también se usa la emisividad de la vegetación y la del suelo. En Cedral y para los procesos visuales y digitales se usaron los resultados de la transformación con la forma I, debido a que con la II se tuvieron valores de temperatura superficial posiblemente menos cercanos a la realidad (sobre todo en la imagen 28/43), y para uniformizar criterios en la región se usa la misma forma en ambas imágenes

Tabla III.8. Valores máximos y mínimos del NDVI utilizados en la transformación de la banda térmica a temperatura.

NDVI	Imágenes de Cedral		Imágenes de Bujaraloz		
	28/43	28/44	Marzo	Junio	Agosto
Máximo	0.82979	0.91667	0.992188	0.992188	0.992188
Mínimo	0.01945	0.03097	0.015625	0.023438	0.023438

Al comparar los resultados obtenidos con la forma II en Bujaraloz no se aprecian diferencias significativas entre ETM+6-F1 y ETM+6-F2 (Tabla III.7), sin embargo mediante análisis visual con F1 se discriminan mejor las lagunas y demás cuerpos de agua, por lo tanto es muy probable que esta banda sea de mayor utilidad en la clasificación espectral. Por la razón anterior, la banda resultante de la transformación del IRt (ETM+6-F1) se utilizó como una banda más y es a la que se hace referencia en lo sucesivo como temperatura superficial o banda térmica.

En Bujaraloz los resultados de las dos formas de cálculo de la  $\epsilon$  fueron inversos a los de la imagen 28/43 de Cedral. La forma II mejoró bastante los valores de temperatura superficial encontrados con la forma I sobre todo en la banda ETM+-F2 (Figura III.7 y Tabla III.7). Dichas mejoras se aprecian principalmente en las imágenes de marzo en la que la temperatura media calculada pasa de 52 a 24.2 °C y de junio de 66.8 a 33.6 °C. Es decir, en Bujaraloz con el factor vegetación, se tienen temperaturas superficiales que parecen más reales. En efecto, aunque al igual que en Cedral no se tienen temperaturas tomadas en campo. Es difícil aceptar temperaturas de superficie de 52.7 ó 64 °C, de 66.8 u 80 °C como media y máxima en marzo y junio, respectivamente, obtenidas con la forma I en la banda ETM+6-F2 en Bujaraloz (Tabla III.7). Para Sospedra *et al.* (1998) son posibles temperaturas de superficie de 52 °C en áreas desérticas, cifra muy alejada de los 80 °C calculados por el procedimiento I para el mes de junio. Una opinión definitiva acerca de la validez de la temperatura calculada exigiría medidas en campo.



**F1 y F2** = Ganancia baja o alta según fecha de imagen (Tabla III.3)

Figura III.7. Resultados de la aplicación de las dos formas I y II para la transformación del nivel digital, ND, del IRt a temperatura.

En las estaciones meteorológicas la temperatura ambiental se mide a 1.5 m del suelo y en la vegetación a 2.0 m, en cambio la temperatura obtenida con la banda térmica representa temperaturas a unos 10 cm o quizás menos altura, datos no muy comparables. Teniendo presente lo anterior, se compara la temperatura generada para la banda F1 (forma II) con datos de la estación meteorológica CITA, ubicada a unos 60 km al NO de Bujaraloz (Tabla III.9). Se aprecia que la temperatura media de la imagen de junio está más cercana a la de la vegetación, y la más alejada es la de agosto. Lo anterior se puede deber a que agosto es el mes más cálido y presenta mayor amplitud entre temperatura mínima y máxima. De acuerdo a las clases temáticas creadas (Tabla III.5) la diferencia entre estos valores es 15.4, 21.3 y 24.3 °C para marzo, junio y agosto respectivamente. Sin embargo, el comportamiento de la clase regadío es diferente al

promedio, ya que en marzo la temperatura en la imagen es mayor a la de la estación meteorológica y las de junio y agosto son menores, lo cual es posible que se deba a que hace más frío y existir más influencia del viento.

Tabla III.9. Temperatura (°C) a las 10:00, hora GMT, y fecha de las imágenes para la estación meteorológica de Montañana en parcela lisimétrica de hierba, y temperatura obtenidas con la banda térmica ETM+F1 con la forma II.

Temperatura, °C	Marzo	Junio	Agosto
Del aire a 1.5 m del suelo	12.9	24.1	24.2
De la vegetación, pasto	16.4	29.3	30.4
Promedio en la imagen,	24.3	33.6	39.7
Diferencia: Imagen - Aire	11.4	9.5	15.5
Diferencia: Imagen - Vegetación	7.9	3.2	9.3
Regadío en la imagen, Promedio	20.6	25.5	26.5
Diferencia: Imagen - Aire	7.7	1.4	2.3
Diferencia: Imagen - Vegetación	4.2	-3.8	-3.9

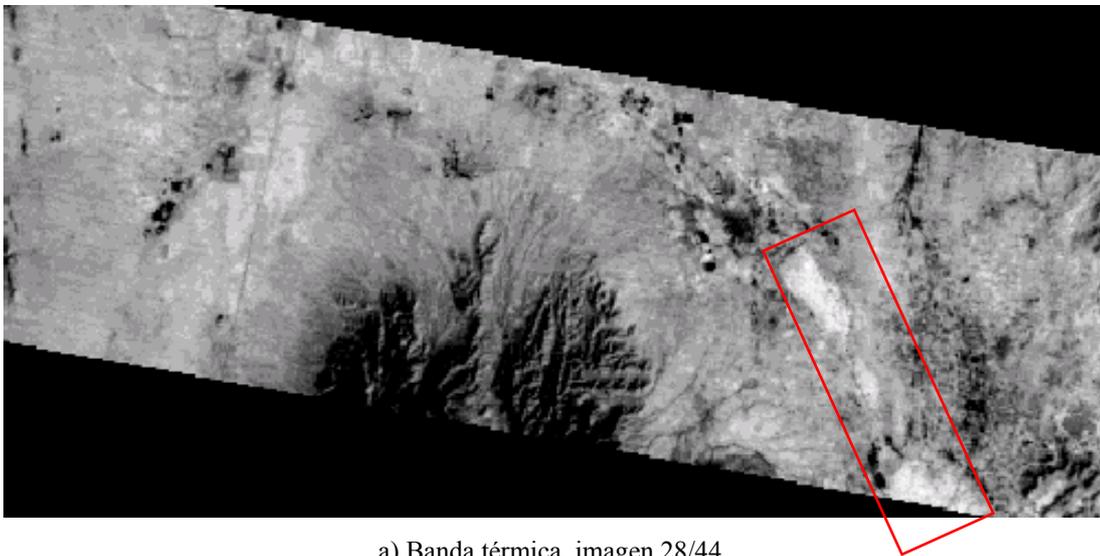
Estación: Montañana CITA-Zaragoza; Latitud: 41° 43' 09" N; Longitud: 0° 49' 11"; Elevación (m): 225.

Para tratar de tener una mejora o simplemente para estar seguros de que no se tienen interferencias en el cálculo de la temperatura, quizás sean necesarias correcciones atmosféricas más detalladas, aunque Valor y Caselles (1996) solamente eliminan las nubes. Debido a la importancia de la emisividad en la determinación de la temperatura Valor y Caselles (1996) es posible la necesidad de determinarla en campo por cubierta vegetal u ocupación del suelo. Para ello se necesita un mapa de ocupación del suelo o un buen conocimiento del área de estudio así como de la emisividad de cada clase de ocupación. Una solución es estratificar con el NDVI, con este criterio Sobrino *et al.* (2004) tuvieron un error de 0.9 K. En Cedral y tampoco en Bujaraloz se estratificó, por lo que en posteriores trabajos y de ser factible sería conveniente realizarla. En resumen se requiere más estudios en áreas desérticas para tener una conclusión definitiva sobre la utilidad de las dos formas de transformar los ND del IRT a temperatura superficial, y de la banda térmica en sí.

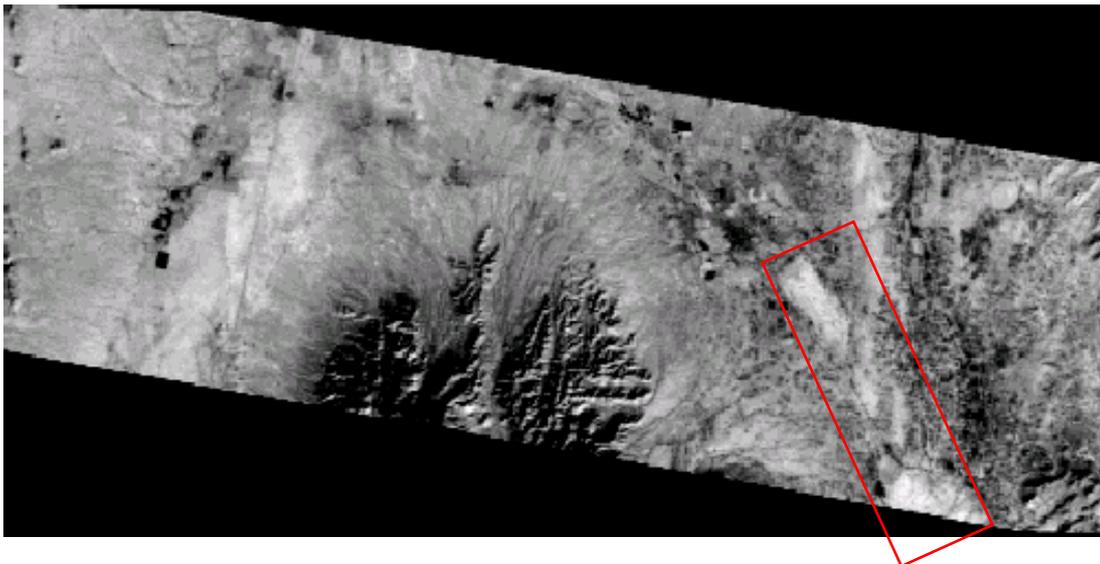
## 6.2. Resultados con las imágenes de Cedral.

### 6.2.1. Análisis visual.

**6.2.1.1. Por banda y albedo.** En general, los suelos desnudos presentan en cada banda los tonos más claros mientras que las áreas de regadío, con vegetación natural densa o con sombra orográfica aparecen en tonos oscuros. El área con yeso somero tiene tonos de gris intermedio en las primeras cuatro bandas, y en la banda térmica estas áreas se manifiestan en tonos claros (Figura III.8), de modo más evidente en la época seca (imagen 28/44) que en la húmeda (imagen 28/43). Ello hace patente la importancia de la banda térmica para discriminar los suelos yesosos, razón por la cual se incluyó en la clasificación supervisada.



a) Banda térmica, imagen 28/44.



b) Banda térmica, imagen 28/43.

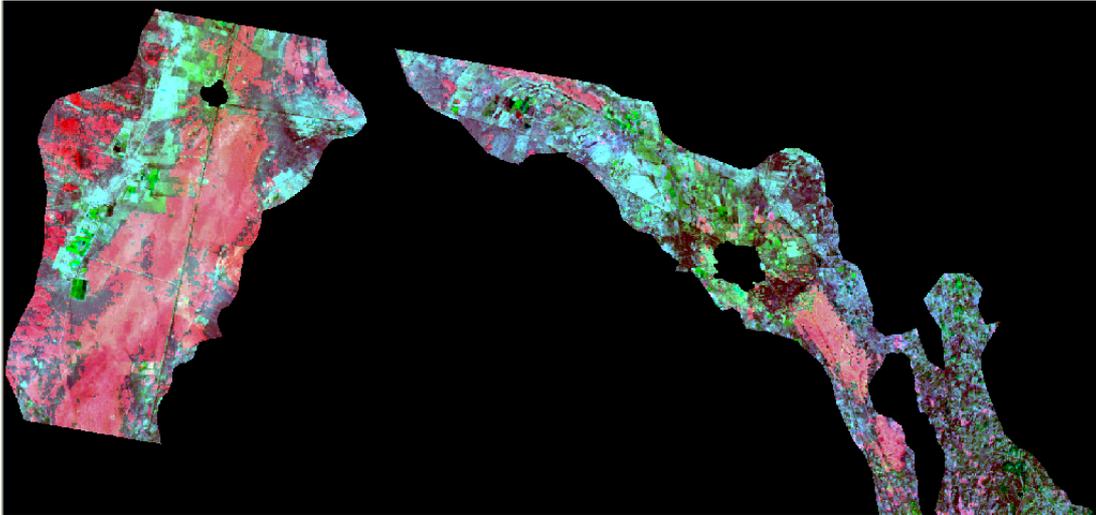
Las áreas gris tenue corresponden a pastizal gipsófilo y horizonte yesoso a unos 3 cm de profundidad  
Figura III.8. Banda térmica por imagen, Cedral.

La transformación a albedo por obtener una sola banda por imagen se incluye en este apartado. Visualmente no mejoraron los resultados, son muy similares a los tenidos con las bandas 4. Ello quizás se deba a que la fórmula mantiene un 72 % de la información de esta banda y sólo un 32 % de la banda 3, apartado 5.2.1.2. Tanto en la banda del albedo de la época seca como de la húmeda el pastizal gipsófilo se confunde con el matorral desértico. Pero resalta muy bien el regadío, con los tonos claros. Esta transformación también resalta el relieve mejor que en cualquier otra banda, sin embargo no es lo que nos interesa en este trabajo.

**6.2.1.2. Composición en falso color en las bandas originales.** Las diferencias de tono e intensidad de los componentes del paisaje en la composición RGB incrementan las posibilidades de discriminación, en comparación al análisis en tonos de gris. Así, en las imágenes en valores de reflectancia, los suelos desnudos, tanto en áreas agrícolas como con escasa vegetación natural, se aprecian en cian con la combinación RGB647 (Figura III.9 y III.10) y solamente varían de color al usar otras bandas.

Las áreas con horizonte yesoso somero y que soportan pastizal gipsófilo se manifiestan en tono rosa o morado según combinación de bandas, aunque también incluyen zonas con matorral desértico poco denso, dificultando la discriminación del pastizal gipsófilo. En general, los análisis visuales que dieron los mejores rendimientos en tonos de gris fueron con las bandas ETM+7, 6, 5, 4 y 3  $\approx$  1, en este orden, y en falso color las composiciones RGB: 675, 647 y 157 son de más utilidad en la discriminación de coberturas, por ello son las que se utilizan en la clasificación supervisada, apartado 6.3.

**6.2.1.3. Composición en falso color con las transformación IHS y TC.** Las composiciones en falso color de las imágenes generadas con las transformaciones Tasseled Cap e IHS no mejoraron los resultados visuales obtenidos con las imágenes sin transformar. Es decir no incrementaron el realce de las áreas yesosas o el contraste de alguna clase en específico. Solamente cambió el color para las diferentes ocupaciones.

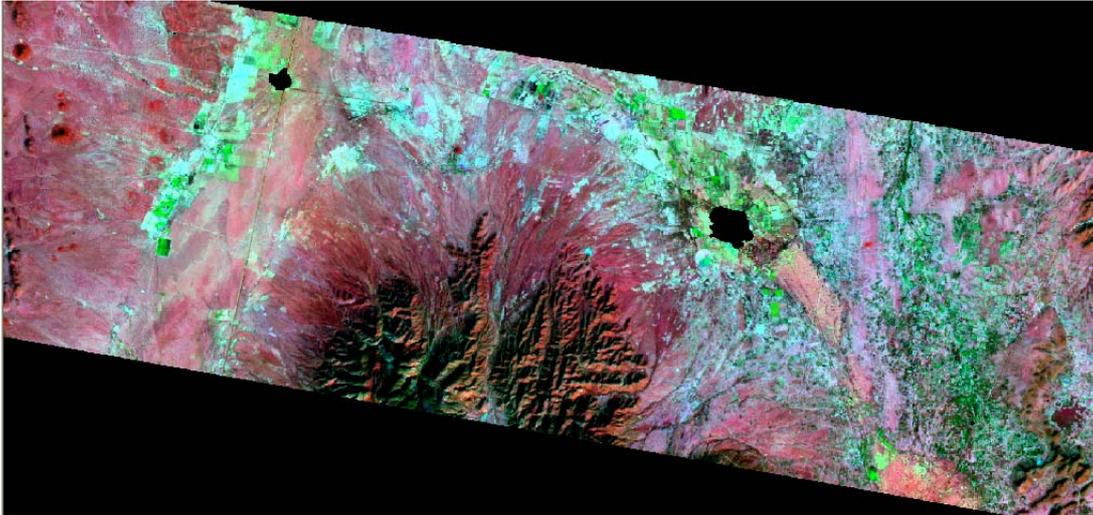


a) I-28/43. Composición falso color: RGB: 647

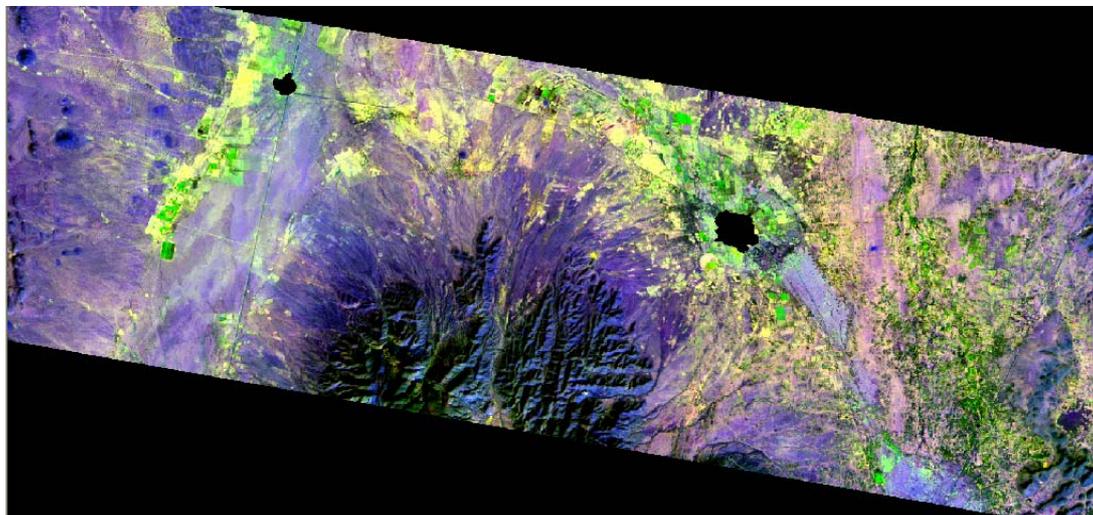


b) I-28/43. RGB: 746

Figura III.9. Algunas composiciones en falso color de mayor utilidad en la toma de las áreas de entrenamiento, área yesosa I-28/43, Cedral.



I-28/43. Composición falso color: RGB: 647



I-28/43. Composición falso color RGB: 746

Figura III.10. Algunas composiciones en falso color de mayor utilidad en la toma de las áreas de entrenamiento, subescena completa I-28/43, Cedral.

**6.2.1.4. Análisis de componentes principales, ACP.** El análisis visual del ACP en composición en falso color, al igual que con las transformaciones Tasseled cap e IHS, no fue mejor al tenido con las bandas originales. Tampoco hubo mejoras con el ACP en grupos de bandas, solamente se discriminó, al igual que con IHS y TC, las áreas con pastizal gipsófilo, sierra, regadío, agricultura de secano (temporal en México) y áreas erosionadas, pero no mejor que con las imágenes sin transformar. Sólo se logra discriminar las coberturas más contrastantes, quizás debido al escaso contraste espectral de estos sobre todo en la época seca; este resultado es insuficiente para los objetivos perseguidos. Younis (1993) obtuvo menor confusión entre litologías sedimentarias y volcánicas con la segunda componente de cada grupo que con las tres primeras CP,

quizás debido a mayor contraste entre litologías de diferente origen, que cuando se tiene sólo sedimentaria. La relativamente poca diferencia espectral entre las coberturas de Cedral se ejemplifica y se discute a más detalle en el siguiente análisis del ACP.

El análisis de ACP mediante dispersogramas, no en forma visual, arrojó resultados poco útiles para detectar píxeles extremos o puros (*endmembers*). La combinación de componentes principales más útil fue la CP1 contra CP2 (Figura III.11). Solamente hay tendencia a identificar los píxeles correspondientes a las áreas con mayor contraste espectral, pero sin relación con la presencia de yeso y en forma no muy clara; por ejemplo se identifican las áreas con la mayor reflectancia y temperatura, las sombras y los cultivos. Los resultados son aún menos satisfactorios cuando el ACP se hace sin la banda térmica o únicamente en el área yesosa, en este último caso parece intervenir la eliminación del contraste espectral de la sierra.

Las áreas con yeso somero o pastizal gipsófilo no se logran discriminar y se ubican en el intermedio de las demás clases. En este caso ni la banda térmica fue de utilidad. En el área yesosa los resultados también fueron muy malos. Los resultados tenidos en la subescena completa en parte coinciden con lo encontrado por Bryant (1996) quien con las CP1 y CP2 entre otros “*endmember*” identifica sombras y “vegetación viva”, lo cual es equivalente al regadío (Figura III.11).

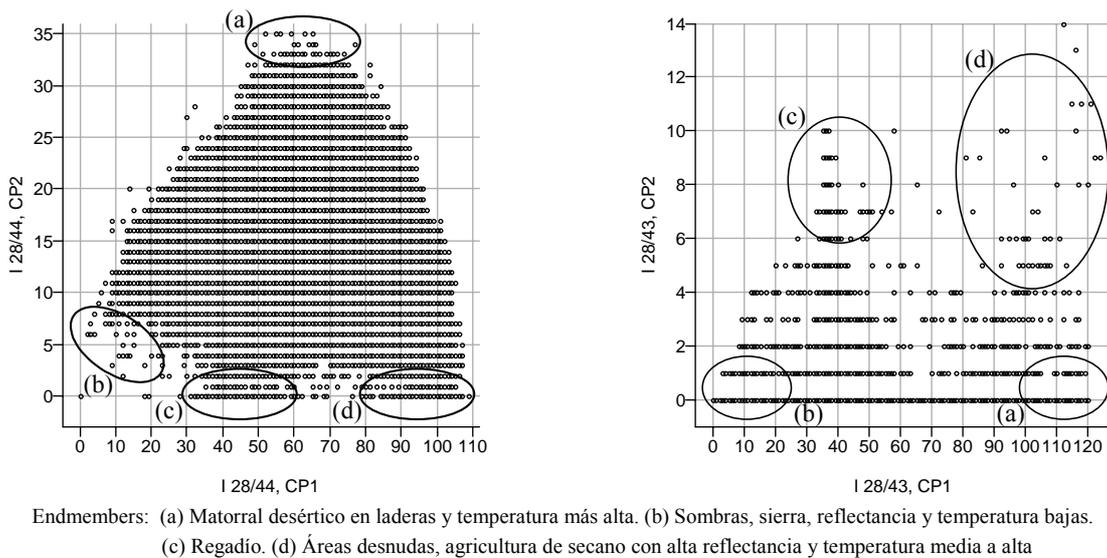
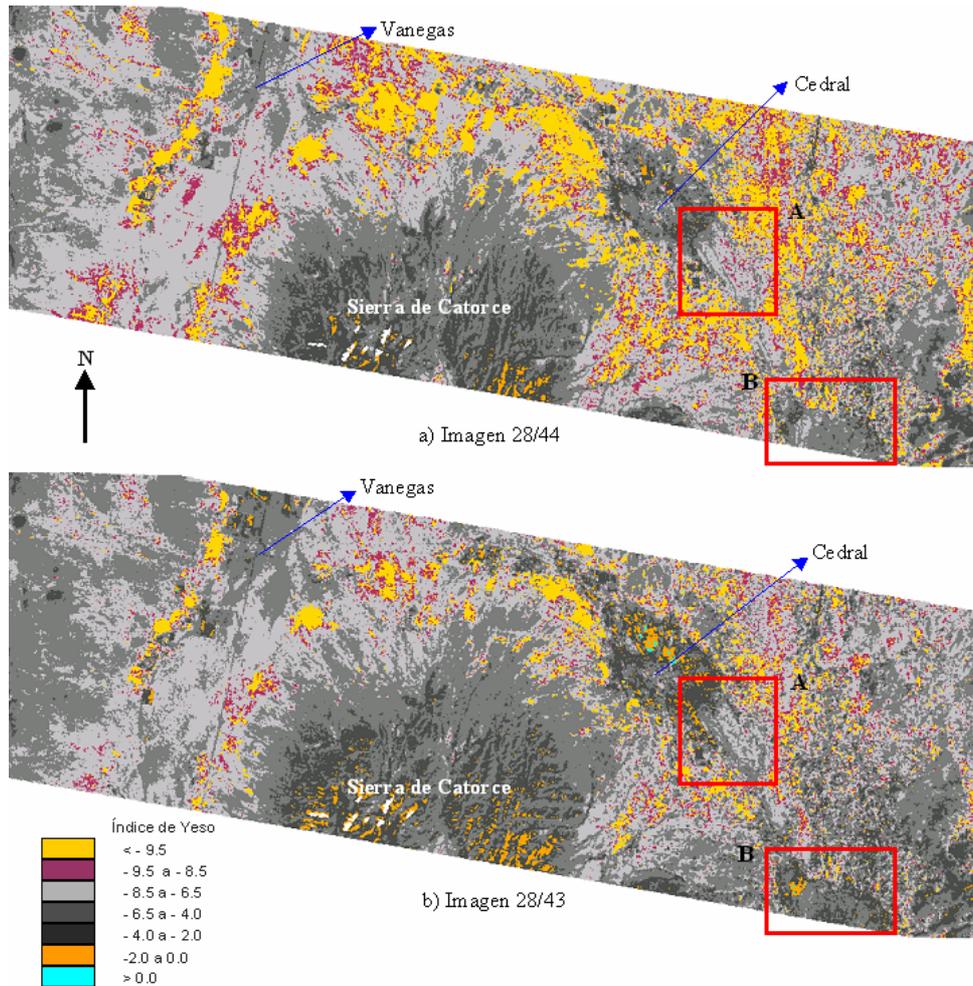


Figura III.11. Dispersogramas del ACP con 7 bandas que muestran los píxeles de mayor pureza respecto a una cobertura o condición del terreno (“*endmembers*”), Cedral.

Nuestros resultados difieren más con los de White y Drake (1993) quienes detectan marga, halita, yeso y roca al graficar la CP2 contra la CP3, quizás debido a mayor diversidad geológica (dolomitas, calizas, arenisca, arcilla, yeso, y anhidrita) con suficiente contraste espectral como para ser discriminados. Los anteriores autores también detectan sombras y vegetación verde, además de otros 5 “*endmembers*”. En Cedral hay menor diversidad litológica al tener solamente sedimentos del Cuaternario (CRM, 1992) excepto en la Sierra Catorce, y únicamente se detectan las coberturas con más contraste espectral. Al respecto White y Drake (1993) dicen que las áreas yesosas se discriminaron porque son arenas con alto contenido de yeso (57-72 %) y porque no tienen cobertura vegetal.

**6.2.1.5. Índice de yeso.** La Figura III.12 presenta los índices de yeso de la imagen de la época seca y húmeda (a y b, respectivamente) en las que las áreas con alta reflectancia, superficie agrícolas sin cultivo y matorral desértico con escasa cobertura vegetal, tienen valores de índice de yeso menores a  $IY < - 8.5$  manifestándose en tonos de gris muy oscuro en la banda original y representados en color amarillo y morado en la Figura III.12. Dichas áreas se localizan en zonas con o sin yeso, ocupando más superficie en la imagen de la época seca (Figura III.12a). El índice de yeso de las áreas con horizonte gipsico somero varía de  $- 8.5 \leq IY \leq - 4.0$ , pero en este intervalo se incluye el matorral desértico, izotal y las áreas con lutita. El pastizal gipsófilo al sureste de Cedral (recuadro A, Figura III.12) en general tiene valores más bajos ( $- 8.5 \leq IY \leq - 6.5$ ) que en el recuadro B ( $-6.5 \leq IY \leq - 4.0$ , Figura III.12) pero sin diferenciarse del matorral desértico.



Los recuadros A y B indican áreas con pastizal gipsófilo y horizonte yesoso a unos 3 cm de profundidad  
 Figura III.12. Índice de yeso, imagen de la época seca (28/44) y húmeda (28/43),  
 Cedral.

Estos resultados son menos satisfactorios que los de Neville *et al.* (2000); para ellos la imagen resultante corresponde bien con la localización aproximada de depósitos de yeso superficial y los valores del índice de yeso más altos correspondieron a extensiones de yeso en la superficie. En Cedral, las áreas con horizonte yesoso somero presentan encima una capa delgada limo arcilloso que afecta sus características espectrales, lo cual puede explicar los resultados menos satisfactorios. Sin embargo, para tener una conclusión definitiva sobre la utilidad o no de este índice es necesario que se obtengan para las imágenes de Cedral, y no aplicar los coeficientes de Neville *et al.* (2000) para las imágenes por ellos estudiadas.

La confusión, tanto en la imagen de la época seca como húmeda, entre el yeso somero y el matorral desértico e izotal quizá se relacione con material carbonatado o lutítico y/o presencia de sello o costra, comunes en suelos áridos con poca vegetación. Neville *et al.* (2000) tuvieron sobrestimaciones del yeso superficial debido a afloramientos de calizas. Para saber si existe alguna relación entre el índice de yeso y las bandas ETM+ incluyendo la térmica, se graficó el índice de yeso y la reflectancia para varios píxeles de las áreas agrícolas sin vegetación, representando en la Figura III.13 las bandas más relacionadas con el índice de yeso.

En general no existe relación entre el índice de yeso y las bandas incluyendo a la térmica. Solamente existe tendencia en las áreas agrícolas sin cultivo con las bandas TM1, 5 y 7 con  $R^2$  de 0.25, 0.31 y 0.62 (I-28/43) y de 0.38, 0.55 y 0.74 (I-28/44) respectivamente (Figura III.13). Conforme se incrementa la longitud de onda o número de banda, al aumentar la reflectancia disminuye (se hace más negativo) ligeramente el Índice de yeso. Sin embargo, este comportamiento no se tiene en las áreas con yeso somero (pastizal gipsófilo). Lo anterior quizás se deba a que existen varios factores que influyen en la reflectancia del horizonte superficial del suelo por ejemplo la textura, compactación, la humedad, la materia orgánica, los óxidos e hidróxidos de Fe y Mn (Chuvienco, 2002; Sobrino *et al.* 2000), por ello para comprender mejor al índice de yeso y encontrar su utilidad, quizás sea necesario estudiar la relación entre la reflectancia e índice de yeso considerando las anteriores características del suelo.

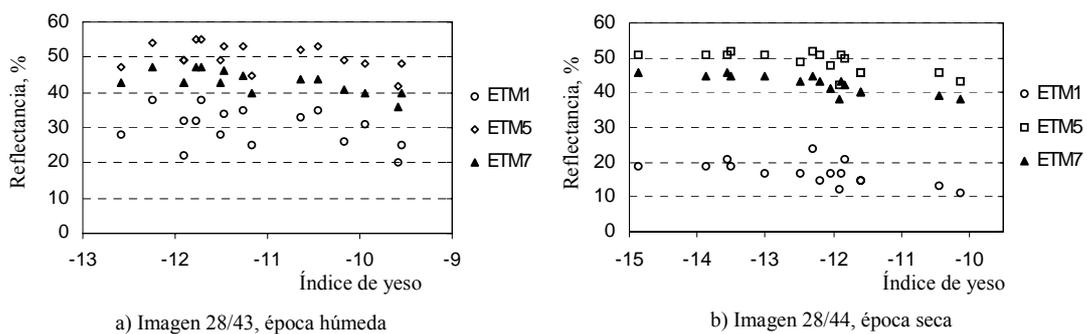


Figura III.13. Relación entre el índice de yeso y la reflectancia para las áreas agrícolas sin cultivo, Cedral.

## 6.2.2. Clasificación supervisada de las imágenes Landsat.

### 6.2.2.1. Área yesosa.

Para la clasificación supervisada del área yesosa se generaron doce clases temáticas correspondientes a los grupos A y B de la Tabla III.3. Las clases pastizal gipsófilo (Pg), agrícola sin verdor (A11), verdor muy bajo (A12), MD sin verdor (B11) y con verdor bajo (B12), tal como se delimitan en las dos fechas, tienen suelos poco profundos, con 50 % o más de yeso a menos de 25 cm de profundidad, y en gran parte cercano a 1 cm. Ello les da temperatura y reflectancia ligeramente diferentes a las demás clases (Figuras III.14 y III.15). El yeso somero confiere al suelo características físicas y químicas que sólo permiten establecerse a plantas adaptadas (Meyer *et al.*, 1992; Guerrero-Campo *et al.* 1999).

En la imagen de la época húmeda la distribución de frecuencias es trimodal (Figura III.14) debido a las diferencias de temperatura entre coberturas, mientras que en la época seca es unimodal al disminuir el contraste espectral (Elvidge, 1990). Las clases B13, B14 y B3 (Tabla III.3) se diferencian de las anteriores por localizarse principalmente en áreas con yeso profundo, según nuestras observaciones de campo. Para las 12 clases, el promedio de los valores de la distancia Jeffries-Matusita (JM) fue de 1412 y 1409 en la imagen 28/44 y 28/43 respectivamente, y la divergencia transformada (DT) de 1999 en ambas imágenes. Son valores de separabilidad altos ya que el máximo posible es de 1414.24 para JM, y de 2000 para DT.

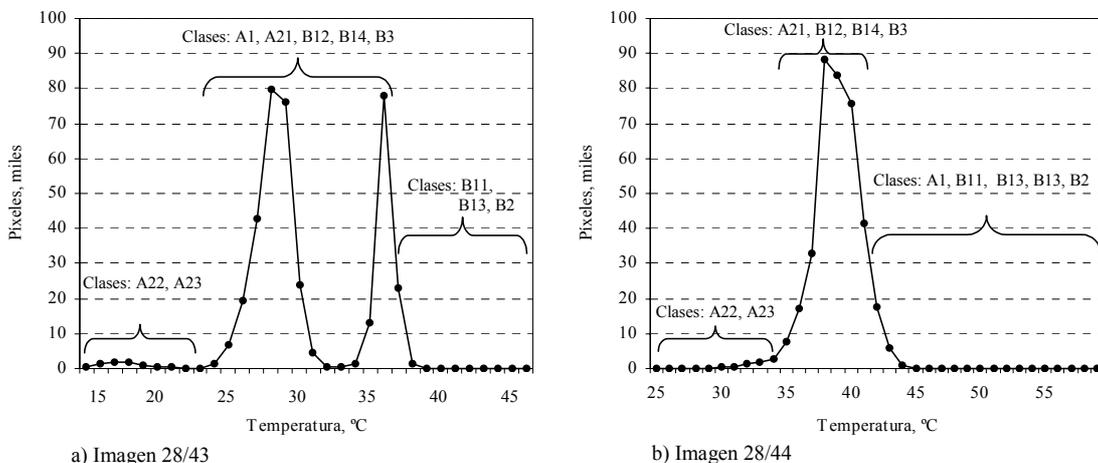


Figura III.14. Distribución de frecuencias de temperatura por imagen y ubicación general de las clases temáticas para el área yesosa, Cedral.

La fiabilidad global de la clasificación de la imagen de la época seca (I-28/44) fue de 0.93 e índice kappa ( $\kappa$ ) de 0.92, y en la imagen de la temporada húmeda (I-28/43) los valores fueron 0.99 y 0.89, respectivamente. La clase verdor muy alto (A2.3) presentó en ambas imágenes los valores de exactitud más bajos (91.1 % exactitud del productor o error de omisión, 75.9 % exactitud del usuario o error de comisión y  $\kappa = 0.76$  en la época seca y 88.2 %, 69 % y  $\kappa = 0.69$  en la época húmeda, respectivamente) debido a su confusión (24 % en la época seca y 27.6 % en la húmeda) con la clase verdor alto (A22), pero aún así se consideran buenos (Tabla III.10). Los valores de los parámetros son más altos en temporada seca debido a la mayor separación entre vegetación verde y seca.

El mayor  $\kappa$  fue para Matorral desértico verdor alto (B14) con 0.98 y 0.97 para la imagen seca y húmeda, respectivamente. El valor de  $\kappa$  más bajo (0.69) se tuvo en la clase A23 (Tabla III.10) considerándose bueno de acuerdo con Fitzgerald y Lees (1994) y los demás son excelentes ( $\kappa > 0.75$ ); según Landis y Koch (1974) serían muy buenos y excelentes o perfectos y casi perfectos, respectivamente.

El pastizal gipsófilo (B2) se discrimina ligeramente mejor (Tabla III.10) en la época húmeda ( $\kappa = 0.98$  en la época húmeda y  $\kappa = 0.97$ , en la seca) y la exactitud cartográfica es de 73.4 % y 79.4 % y del usuario 98.8 % y 97.8 % para la época húmeda y seca, respectivamente. Esta clase incluye en la época húmeda un 20 % de la clase B11, 4.5 % de B1.3 y 2.11 % de B12 (exactitud cartográfica), para la época seca los valores disminuyen. La discriminación del pastizal gipsófilo (B2) frente al matorral desértico sin verdor (B11) y verdor bajo (B12), se ve favorecida por la diferencia de temperatura de B2 respecto a las otras dos. Sin embargo, existen áreas de B11 y B12 cuya temperatura es similar a la del B2, debido a la baja densidad del matorral, presencia de sello o costra, erosión o con apacentamiento excesivo. Estas áreas se consideran de transición, y podrían llamarse pastizal gipsófilo con matorral desértico, pero requieren estudios más detallados para delimitarlas.

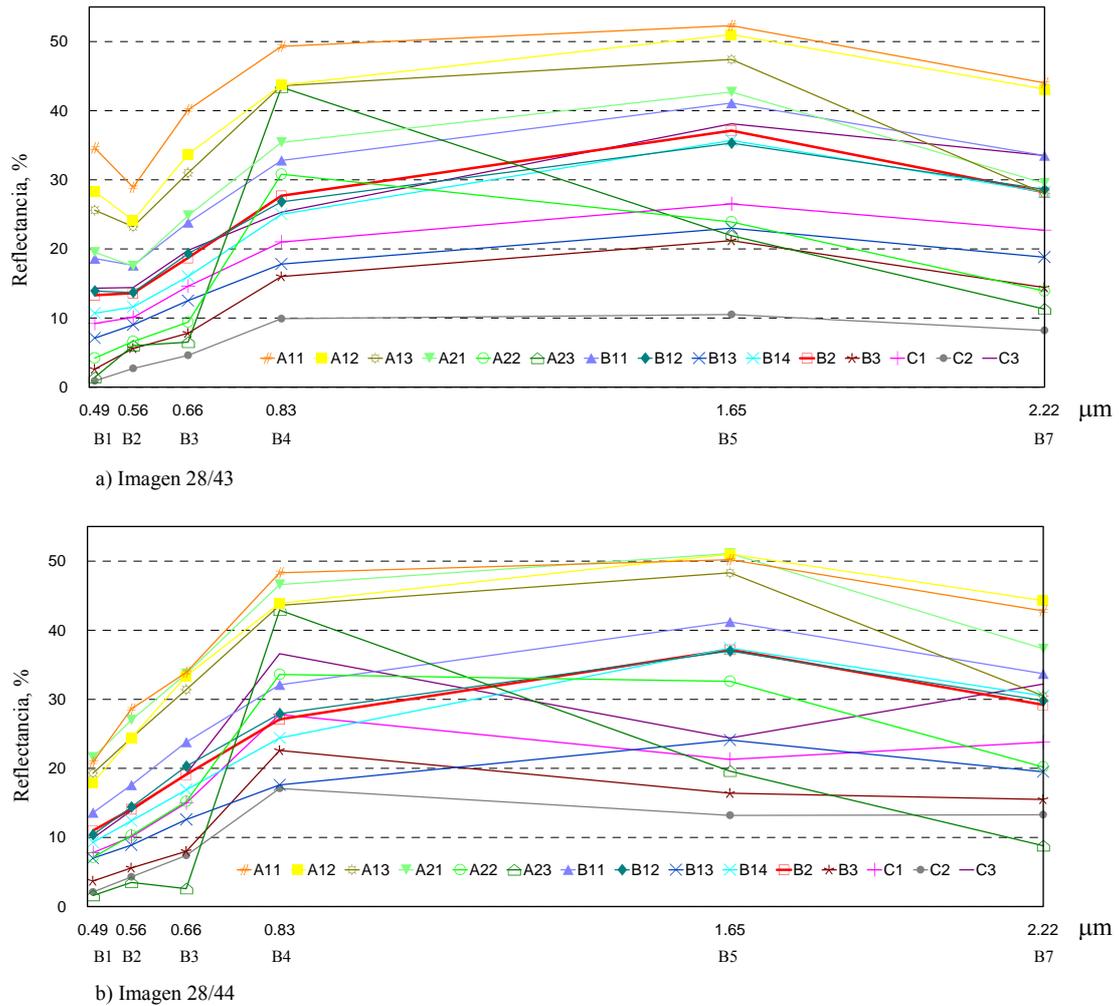


Figura III.15. Firma espectral de las clases temáticas mencionadas en la Tabla III.4. Imagen de la época húmeda (I28/43) y seca (I28/44), Cedral.

En las dos imágenes, las clases A11 a A13 relacionadas con la agricultura de temporal, llamada de secano en España, dan las mayores reflectancias, como se observa en la Figura III.15. Destaca la clase A11, que por incluir áreas erosionadas tiene fuerte participación del yeso edáfico o de la roca, o de horizontes petrocálcicos (tepetate) aflorantes; como además son áreas medianamente salinas (CETENAL, 1972; INEGI, 1983) la reflectancia aumenta principalmente cuando forma costra, condición que se encontró en algunas áreas salinas pero que cuya presencia no es posible generalizar debido a la alta movilidad de las sales.

Tabla III.10. Resumen de la matriz de confusión de las imágenes de Cedral.

Clase temática	Área yesosa									
	Imagen 28/44. Época seca					Imagen 28/43. Época húmeda				
	EI	ErC	EC	EO	$\kappa^*$	EU	ErC	EC	EO	$\kappa^*$
A11	91.3	8.7	93.3	6.7	0.91	96.5	3.5	97.2	2.8	0.96
A12	93.0	7.0	90.2	9.8	0.93	87.4	12.6	92.7	7.3	0.87
A13	92.1	7.9	94.9	5.1	0.92	92.7	7.3	94.1	5.9	0.92
A21	85.6	14.4	92.2	7.8	0.85	96.1	3.9	86.2	23.6	0.96
A22	97.5	2.5	86.2	13.8	0.97	92.8	7.2	92.2	7.8	0.92
A23	75.9	24.1	91.1	8.9	0.76	69.0	13.0	88.2	11.8	0.69
B11	91.2	8.8	95.1	4.9	0.89	73.0	27.0	99.9	0.1	0.69
B12	86.8	13.2	98.1	1.9	0.85	92.6	7.4	96.1	3.9	0.92
B13	91.6	8.4	100.0	0.0	0.91	86.7	13.3	100.0	0.0	0.86
B14	97.9	2.1	90.6	9.4	0.98	97.3	2.7	88.0	12.0	0.97
B2	97.8	2.2	79.4	20.6	0.97	98.8	1.2	73.4	26.6	0.99
B3	93.5	6.5	99.6	0.4	0.93	94.4	5.6	99.2	0.8	0.94
DT			1999.0					1999.0		
JM			1412.0					1409.0		
FG			0.93					0.99		
$\kappa^{**}$			0.92					0.90		
Clase temática	Subescena completa									
	Imagen 28/44. Época seca					Imagen 28/43. Época húmeda				
	EI	ErC	EC	EO	$\kappa^*$	EU	ErC	EC	EO	$\kappa^*$
A11	77.8	22.2	89.5	11.5	0.77	63.0	37.0	88.4	11.6	0.62
A12	68.3	31.7	93.3	6.7	0.68	71.3	28.7	98.3	1.7	0.71
A13	92.1	7.9	89.7	11.3	0.92	61.4	38.6	62.6	37.4	0.60
A21	91.3	8.7	99.4	0.6	0.91	98.3	1.7	70.5	29.5	0.98
A22	98.8	1.2	82.9	17.1	0.99	93.6	6.4	97.5	2.5	0.93
A23	71.4	28.6	100.0	0.0	0.71	98.6	1.4	93.2	6.8	0.99
B11	98.0	2.0	94.1	5.9	0.98	98.5	1.5	87.9	12.1	0.98
B12	91.1	8.9	96.8	3.2	0.91	69.3	30.7	91.4	8.6	0.68
B13	75.9	24.1	80.4	19.6	0.74	79.0	21.0	75.8	14.2	0.77
B14	82.7	27.3	76.8	23.2	0.81	89.5	10.5	71.4	28.6	0.89
B2	94.1	5.9	91.9	8.1	0.94	84.2	15.8	75.9	24.1	0.83
B3	91.1	8.9	22.4	77.6	0.91	96.8	3.2	27.6	72.4	0.97
C1***	89.8	10.2	89.6	11.4	0.88	91.0	9.0	90.0	10.0	0.89
C2***	87.6	12.4	97.1	2.9	0.82	83.5	16.5	98.1	1.9	0.76
C3***	79.7	20.3	82.0	18.0	0.79	90.2	9.8	81.1	18.9	0.90
DT			1991.5					1977.6		
JM			1406.3					1397.9		
FG			0.88					0.85		
$\kappa^{**}$			0.85					0.82		

NOTA: Exactitud de identificación (EI) y cartográfica (EC); Error de comisión (ErC) o exactitud del usuario y de error de omisión (EO) o exactitud del productor; estadístico Kappa global ( $\kappa^{**}$ ) y por clase ( $\kappa^*$ ); Divergencia transformada (DT), Distancia Jeffries-Matusita (JM), Fiabilidad global (FG). \*\*\* Clases presentes solamente en la subescena completa.

De acuerdo a la diferencia espectral entre las clases temáticas (Figura III.15) el orden de importancia de las bandas en la discriminación de las coberturas es 6, 5, 7, 4, 3, y 1, lo cual concuerda con los resultados del análisis visual. El resultado coincide con Goossens y Van Ranst (1998) y con Goossens *et al.* (1999), pero no bien con Younis (1993) en Murcia, España, para quien las mejores bandas fueron TM1,2,3 y después la TM5 y 7; del mismo modo García y Pérez (2001) en un trabajo en la Comunidad de Madrid, España, las bandas que discriminan con mayor nitidez los yesos, materiales margo-yesosos y calcáreos son la ETM+1, 2 y 3.

Es probable que la mejor relación los resultados de Goossens y Van Ranst (1998) en el desierto de Irán y Goossens (1999) para el desierto de Egipto, se deba a que al igual que en Cedral el origen del sustrato es sedimentario y la topografía casi plana, con relativamente poca variabilidad espectral; en cambio el área estudiada por Younis (1993) es más accidentada y la existencia de rocas sedimentarias y volcánicas originan más variación en la composición del horizonte superficial y en su reflectancia, resultando de utilidad otras bandas.

En Cedral, la banda cuatro fue lógicamente muy útil en las áreas con vegetación, aunque al no considerarla en la clasificación supervisada la precisión variaba muy poco. Las bandas TM1 y TM3 tuvieron comportamiento similar siendo ligeramente más útil la banda TM3, al quitar alguna de ellas la exactitud de la clasificación digital se afectaba por igual, lo cual coincide con lo reportado por Goossens y Ranst (1998) en cuanto a que aportan información similar.

#### 6.2.2.2. Subescena completa.

Al clasificar la subescena completa con las siete bandas se incluyeron las clases C1, C2 y C3 (Tabla III.4 y Figura III.16) ausentes en el área yesosa. Al considerar las áreas sin presencia de yeso, se incrementa la confusión entre clases, disminuyendo la separabilidad entre ellas, decreciendo más la divergencia transformada (DT) que la distancia de Jeffries-Matusita (JM); pese a ello, los cambios son muy bajos y la separabilidad es buena. Un comportamiento similar se observa en la fiabilidad global (FG) y en el índice kappa,  $\kappa$ , y si habláramos en porcentaje, la FG de la imagen 28/43 disminuye en un 14 % y la de la imagen 28/44 en un 5 %. La diferencia del cambio entre las dos imágenes es menor para  $\kappa$  siendo del 8 % en la imagen 28/43 y del 7 % en la I-28/44 (Tabla III.10).

La disminución de la exactitud se debió al incremento en la confusión entre clases de la misma categoría. En la imagen I-28/43 aumentó la confusión entre las clases A1 de acuerdo a la exactitud de identificación (EI), A11 se confundió un 37 % con la clase A13. O entre clases de diferente categoría, por ejemplo de acuerdo a la EI la confusión de la clase A13 con B14 fue de 13.6 %. Otra confusión se presentó entre las clases A22 y A23.

Para la clase B2 (pastizal gipsófilo) también disminuye la EI respecto a los resultados tenidos en el área yesosa, de este modo en la imagen 28/44 disminuye un 3.7 % con un error de comisión del 5.9 %. En la imagen 28/43 el error de comisión es mayor (15.8 %) y equivale a un descenso de EI del 14.6 %, lo cual es más importante. La razón es que esta clase se confunde un 7.1 % (EI) con la nueva clase C2, un 2.8 % con B14 y un 2.6 % con B11.

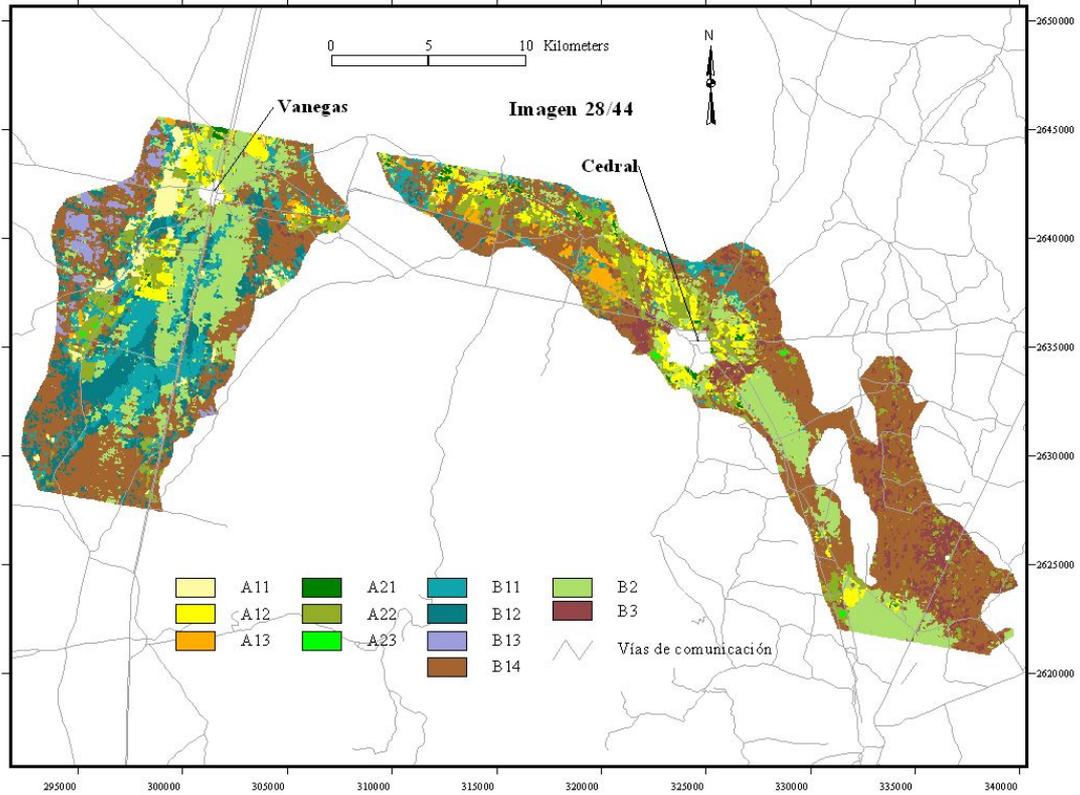
La confusión con C2 se puede deber a que en ella predomina el litosol con fase petrocálcica (CETENAL, 1972). La firma espectral de suelos someros, con horizonte petrocálcico, color claro, escasa cubierta vegetal, etc. se asemeja más a la firma espectral de los suelos yesosos de la clase temática B2, por lo tanto se confunden y se clasifican como tal.

La clase B2 en la imagen 28/43, finales de la época húmeda, se sobreestima debido principalmente a que superficies correspondientes a la clase B14 y C2 con suelo somero y erosionadas (CETENAL, 1972) se clasifican como B2 (Figuras III.16 y III.17 y Tabla III.11), incluso estas áreas se confunden en la composición en falso color (Figura III.9 y III.10). Esta confusión posiblemente se evitaría si se dividiera la clase B14 en dos: con y sin erosión.

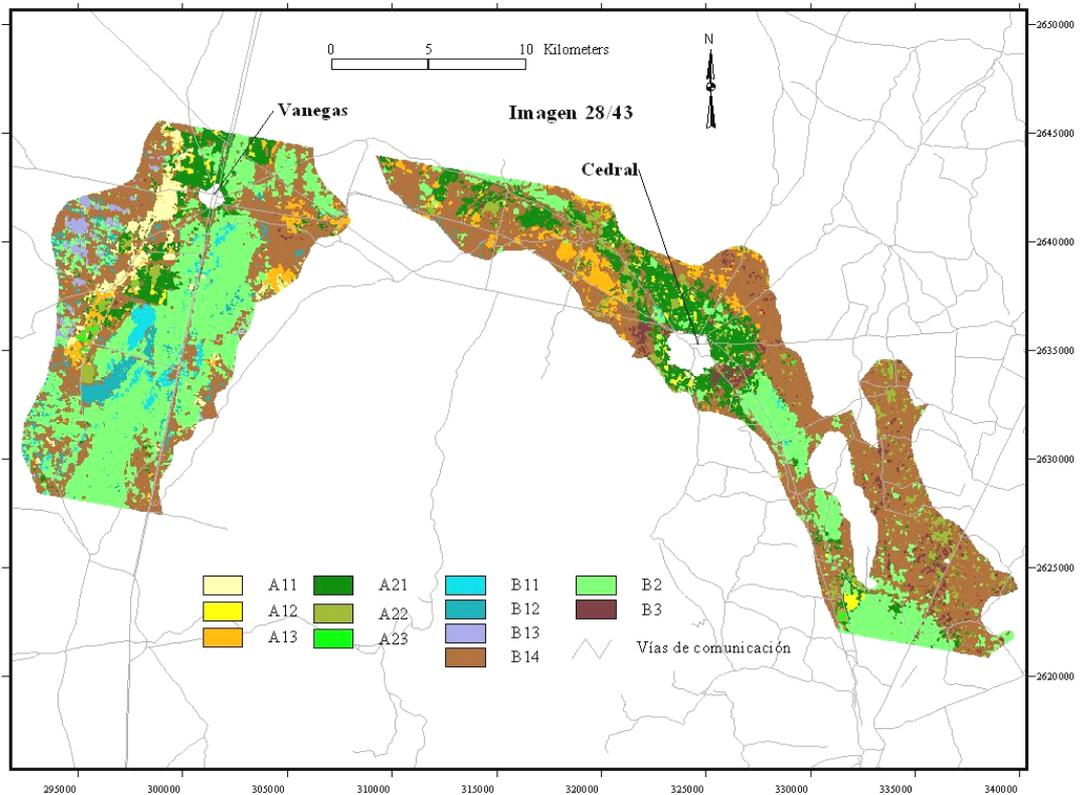
En el área de estudio las firmas espectrales de B2 y B14 son similares, y en ambas imágenes las dos clases presentan temperatura altas, siendo mayores en la imagen de la época seca (I-28/44). Dichas firmas se parecen menos con las de las clases A1, que incluye áreas erosionadas y presenta los valores de reflectancia más altos. Por tales razones ésta área se clasifica como yesosa. Sin embargo se requiere verificación de campo y más trabajo con las imágenes para llegar a una conclusión definitiva sobre la razón de la confusión y con ello a una mejor discriminación entre estas dos clases.

Tabla III.11. Superficie (ha, %) por clase temática, Cedral.

Clase temática	Área yesosa, máscara				Subescena completa			
	Imagen 28/44		Imagen I28/43		Imagen 28/44		Imagen I28/43	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
A11	655.5	1.92	890.5	2.6	635.0	0.6	911.1	0.9
A12	1764.8	5.18	402.1	1.2	1481.9	1.4	741.1	0.7
A13	690.2	2.02	1427.4	4.2	1708.0	1.6	2985.0	2.8
A21	247.7	0.73	4307.2	12.6	166.0	0.2	4585.4	4.4
A22	3483.5	10.22	1356.0	4.0	6255.8	6.0	641.0	0.6
A23	73.8	0.22	66.7	0.20	92.9	0.1	279.0	0.3
B11	2990.9	8.77	729.6	2.1	4346.1	4.2	3198.7	3.1
B12	3093.4	9.07	1320.1	3.9	6635.0	6.3	7399.1	7.1
B13	587.8	1.72	379.3	1.1	5515.2	5.3	6473.1	6.2
B14	12643.2	37.08	13472.6	39.5	43417.5	41.4	38807.3	37.0
B2	6031.7	17.69	8905.6	26.1	4391.1	4.2	8996.7	8.6
B3	1838.6	5.39	843.7	2.5	5336.3	5.1	3874.5	3.7
C1					6441.7	6.2	7244.7	6.9
C2					14894.2	14.2	15277.1	14.6
C3					3446.2	3.3	3349.8	3.2
Total	32262.4	100.0	33257.2	100.0	104762.9	100.0	104763.6	100.0



a) Imagen 28/44, época seca



b) Imagen 28/43, época húmeda

Figura III.16. Distribución de las clases temáticas de ocupación del suelo en el área yesosa, suavizada con un filtro 3x3 y estadístico moda, Cedral.

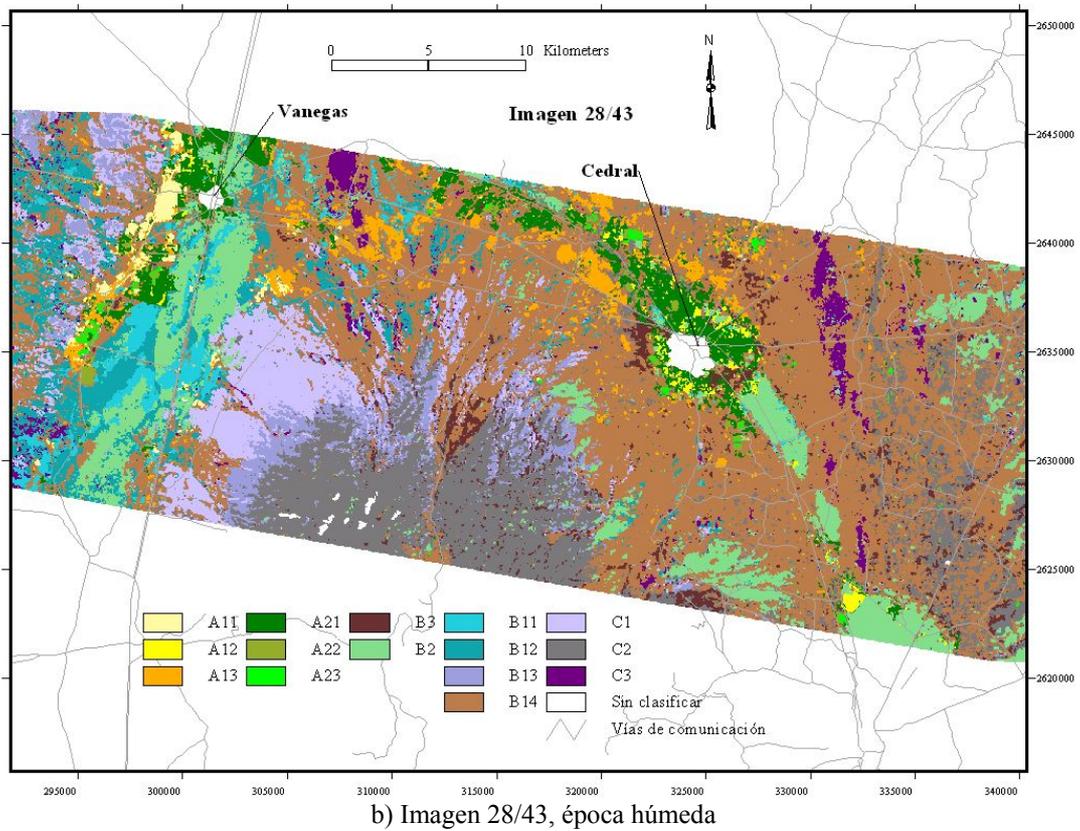
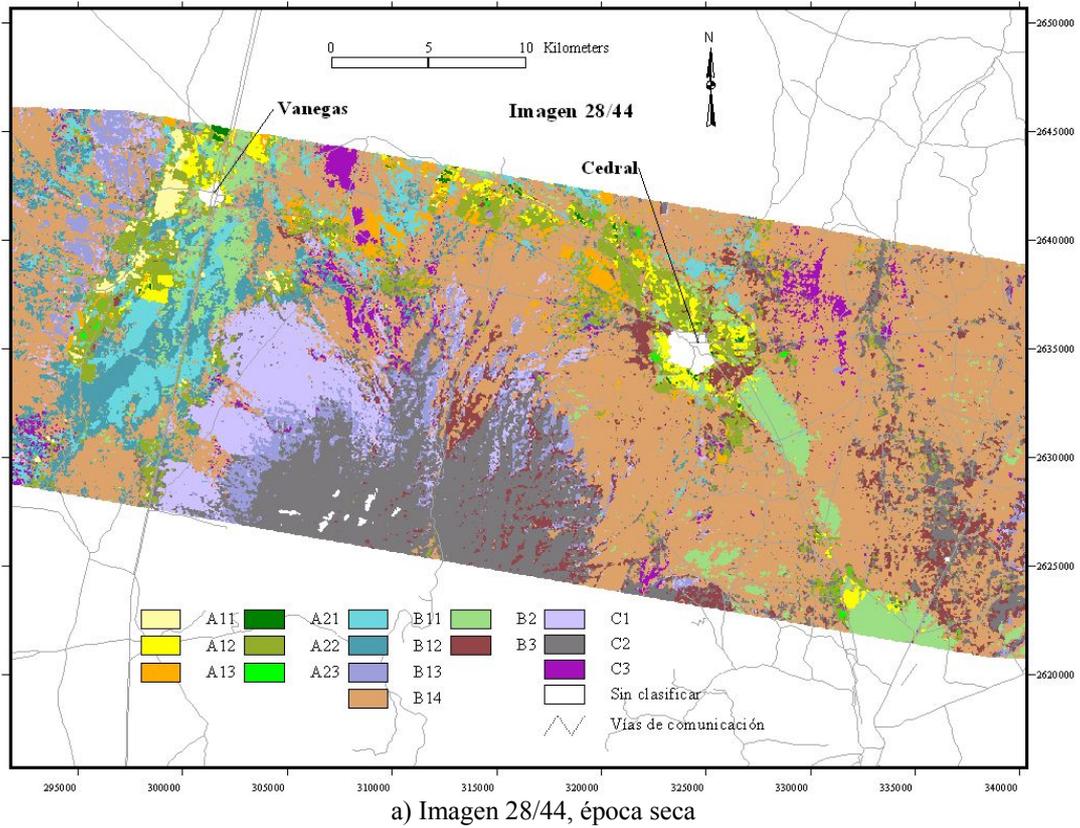


Figura III.17. Distribución de las clases temáticas de ocupación del suelo en la subescena completa, suavizada con un filtro 3x3 y estadístico moda, Cedral.

### 6.2.3. Utilidad de la banda térmica.

La banda del infrarrojo térmico fue de gran ayuda en la discriminación de coberturas, ya que las áreas con yeso superficial presentan mayor temperatura y en la época húmeda se separan aún mejor (Figura III.18). Esto permite separar clases que se confunden en las bandas del visible e infrarrojo (VIR). Por ejemplo, en la temporada húmeda, el Pastizal gipsófilo (B2) y Matorral desértico (B11) se logran discriminar bien debido a que presentan diferente temperatura, siendo más alta en B2 (36.9 °C) que en B11 (32.5 °C).

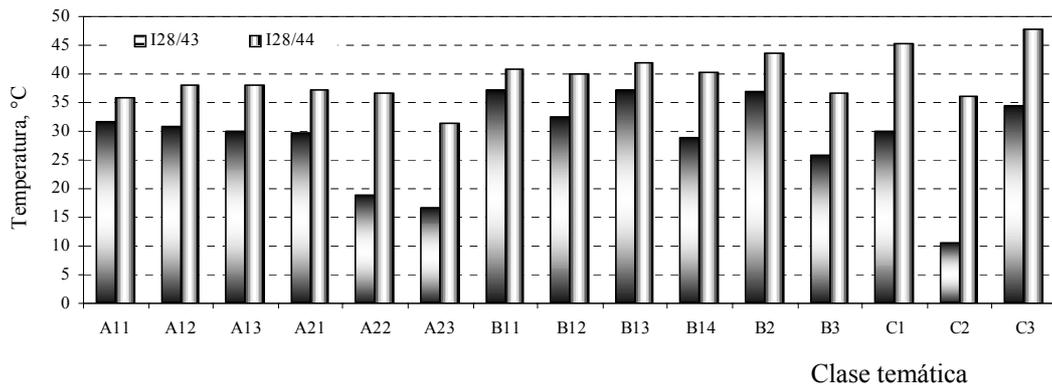


Figura III.18. Temperatura de las clases temáticas mencionadas en la Tabla III.4. Imagen de la época húmeda (I28/43) y seca (I28/44), Cedral.

Considerando los valores de temperatura calculados con la imagen de la época húmeda (Figura III.18) se forman cuatro grupos de coberturas. Con temperaturas bajas (< 24 °C) están los cultivos con verdor alto y muy alto (A22 y A23), y con altas (> 36 °C) se incluye el Matorral desértico sin verdor y verdor bajo y el Pastizal gipsófilo (B11, B12 y B2). El Mezquital (B3) tiene temperatura de 25.8 °C y las otras clases quedan entre B3 y el grupo de temperaturas altas. En la imagen de la época seca no se forman los cuatro grupos debido al bajo contraste espectral de la vegetación seca (Elvidge, 1988, 1990).

El pastizal gipsófilo (B2) presenta mayor temperatura en la época seca (43.4 °C) que en la húmeda (36.9 °C), debido al mayor desarrollo de la vegetación en la temporada de lluvias y descenso en la temperatura dado alto contenido de agua en las hojas (Elvidge, 1988), pudiéndose tener hasta 18 °C menos con una cubierta vegetal del 100 % (Czajkowski *et al.*, 2001). Dicho decremento se aprecia, por ejemplo, en la temperatura de las clases agrícolas verdor muy alto (A23 = 16.7 °C) y verdor bajo (A13 = 38 °C).

Al hacer la clasificación supervisada sin la banda térmica disminuye la separabilidad entre clases (DT y JM), aunque los valores promedio generales prácticamente se mantienen igual tanto en el área yesosa como en la subescena completa (Tabla III.12), los cambios son menores al 1 %. A nivel general no se aprecia cambios con o sin la banda térmica debido a que algunas clases tienen temperaturas similares o incluso iguales, por ejemplo las clases A12 y A13 tienen 38.1 °C y A21 37.2 °C, B3 y A22 36.6 y 36.7 °C en la imagen de la época seca, o A11 con 31.6 y A12 31.0 °C en la época húmeda (Figura III.18). Para estas clases la inclusión de la banda térmica en vez de facilitar su discriminación la empeora, separándose al clasificar sin la banda térmica. Otras clases sí tienen temperatura diferente o distintiva que facilita su discriminación, por ejemplo entre B3 y A22 con 25.8 y 19 °C en la época húmeda. Por eso la mejora que se tiene en algunas clases se contrarresta con la confusión entre otras, manteniéndose constante la separabilidad global.

Sin embargo cuando se analizan los cambios de separabilidad por clase, una de las más afectadas es B2, para esta clase en el área yesosa la DT se reduce en 37.5 % y 42 % y la distancia JM en un 26 % y 32 %, para las imágenes de la época seca y húmeda, respectivamente (Tabla III.9). El comportamiento se mantiene en la subescena completa, únicamente la disminución de la separabilidad es ligeramente mayor en la imagen de la época húmeda, I-28/43. Al no considerar la banda térmica la clase pastizal gipsófilo (B2) se confunde principalmente con el matorral desértico sin verdor (B11) y verdor bajo (B12) en la época seca debido a que estas clases tienen poca cobertura vegetal, claros con pastizal y presencia de sello que afecta la reflectancia y temperatura de estas clases.

En lo dicho se aprecia la importancia de la temperatura en la discriminación de esta clase, y sobre todo en la imagen de la temporada de lluvias. Por ello, se incluyó la banda del infrarrojo térmico en la clasificación supervisada. La banda térmica al representar a la energía emitida por los componentes de la escena, proporciona información diferente a la de las demás bandas, de esta manera facilita la separación de los terrenos con yeso a escasos cm de profundidad, correspondiendo en Vanegas a un *Petrogypsid* cálcico y en Cedral a un *Haplogypsid* léptico clasificados según Soil Survey Staff (1999).

Tabla III.12. Cambios en la separabilidad al no considerar la banda térmica en la clasificación, Cedral

Imagen	Valores promedio				Separación más baja de la clase B2 (pastizal gipsófilo)			
	Divergencia transformada		Jeffries Matusita		Divergencia transformada		Jeffries Matusita	
	Con T	Sin T	Con T	Sin T	Con T	Sin T	Con T	Sin T
Área yesosa								
28/44	1998.7	1984.7	1412.4	1402.2	1951.9	1220.7	1394.0	1029.7
%*		0.7		0.72		37.5		26.1
28/43	1999.1	1982.2	1409.4	1394.4	1991.2	1153.0	1326.3	901.7
%*		0.85		1.06		42		32.1
Subescena completa								
28/44	1997.2	1986.9	1410.3	1402.2	1382.1	1229.4	1414.2	1021.9
%*		0.52		0.57		11.1		27.7
28/43	1996.8	1982	1410.3	1397.7	1990.5	906.4	1407.7	906.1
%*		0.74		0.89		54.5		35.6

\* Porcentaje de diferencia o cambio de la separabilidad sin la banda térmica.

### 6.3. Resultados con las imágenes de Bujaraloz.

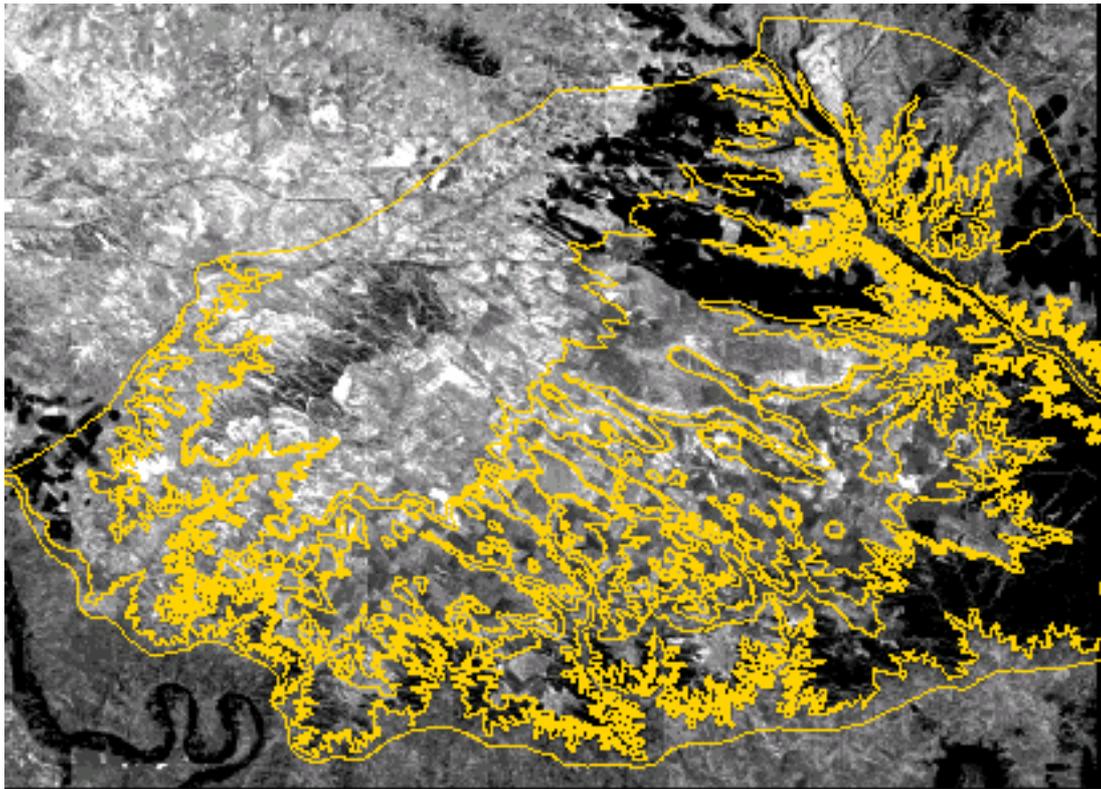
En este apartado se presentan los resultados obtenidos en Bujaraloz, sin embargo con el fin de comparar se hace mención a lo obtenido en Cedral, donde se considera pertinente.

#### 6.3.1. Análisis visual

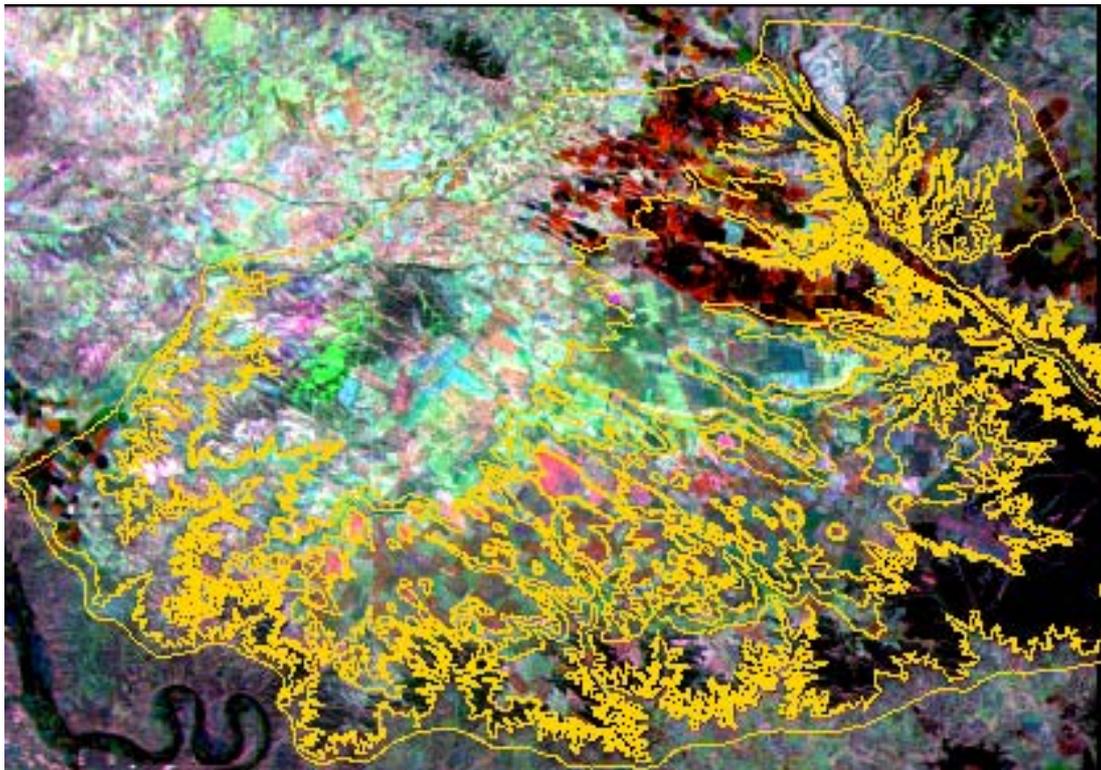
**6.3.1.1. Por banda y albedo.** El análisis visual de cada banda proporcionó poca información de las áreas yesosas. Los suelos desnudos, principalmente en las bandas 1, 2 y 3 se presentan en tonos blancos, sin una diferencia clara entre suelos con o sin yeso. Este comportamiento es similar en las tres imágenes. El yeso no se diferencia con claridad de las rocas calizas o lutitas (Figura III.19), estas dos clases presentan tonos ligeramente más oscuros, quizás debido a la presencia de vegetación natural o cultivada.

La tonalidad de las unidades litológicas con yeso en la banda correspondiente al albedo fue muy similar a la de la banda 4 de las imágenes de junio y agosto, y a las bandas 5 y 7 de la imagen de marzo. Al igual que con las otras bandas se separan bien las calizas, calizas-margocalizas en Serreta Negra y las lutitas verdes. Tanto en Bujaraloz como en Cedral con el albedo no se logra discriminar las áreas yesosas, y solamente discrimina o resalta mejor el relieve que cualquier otra banda.

En términos generales las bandas de mayor utilidad en la discriminación litológica fueron la ETM1  $\approx$  2, 7  $\approx$  5, 4, 3, banda del infrarrojo térmico y por último la del albedo. Estos resultados son ligeramente diferentes a los de Cedral sobre todo en el orden de importancia de las bandas y utilidad de la banda térmica. Ello, posiblemente se deba a la mayor variabilidad tanto litológica como de vegetación en Bujaraloz; también la topografía es más accidentada y las diferencias de relieve afectan la reflectancia por el sombreado e iluminación, efecto no presente en Cedral (salvo en la Sierra Catorce) cuya topografía es plana con ligeras ondulaciones.



a) Banda ETM1



b) RGB = ETM1marzo, junio, agosto

Figura III.19. Banda ETM+1 de la imagen de agosto (a) e imagen RGB multitemporal de la misma banda (b, R=marzo, G=junio y B=agosto) y superpuesto el mapa litológico de Salvany *et al.* (1996), Bujaraloz.

### 6.3.1.2. Composición falso color, CFC, con las bandas originales.

De las CFCs con la misma banda de las tres fechas (o multitemporal), se encontró que la composición RGB con ETM1 (marzo, junio y agosto, Figura III.19) el yeso se confunde con la caliza, y con la lutita roja a partir de la Val Cenicera hacia el sur y al este; en la parte norte el yeso se confunde con la lutita verde-yesos presentando un color verde-amarillo. La clase temática lutita verde-caliza tiene el mismo color que el yeso solamente que más oscuro, y la caliza es de color azul-morado.

Las composiciones RGB multitemporales con ETM2 y ETM3 son muy similares. En la combinación multitemporal con ETM4 se confunden aún más las litologías debido a la interferencia de la vegetación. En la RGB con ETM5 el yeso se confunde con la lutita verde-yeso y un poco con la lutita verde-caliza; la caliza presenta colores verdes más tenues. En la RGB con ETM7 los colores son más intensos y cambian a azul-morado.

Las diferencias de temperatura entre las clases temáticas es poca y por ello se confunden en la composición RGB. Igual que con el albedo, el yeso se confunde con lutita verde-yeso y con lutita verde-caliza. Es decir existe poca separabilidad entre el yeso y las lutitas verdes por un lado y entre el yeso y las calizas por otro, quizás por no ser clases temáticas puras.

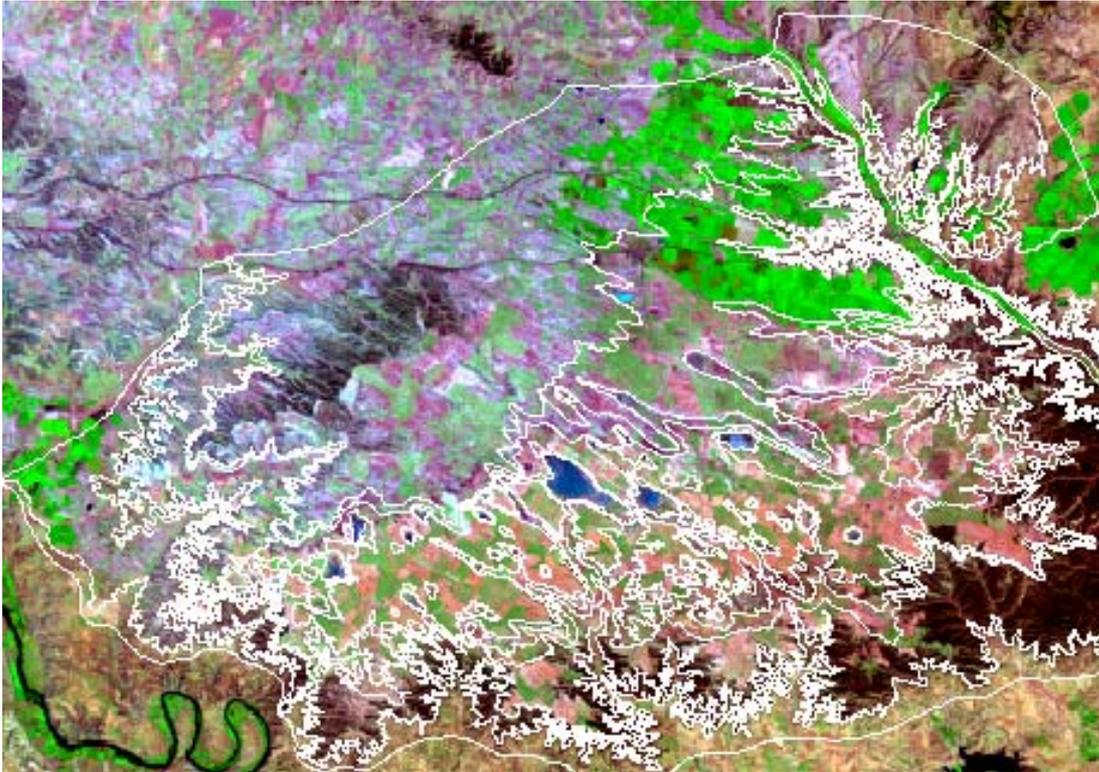
Las combinaciones RGB utilizando diferentes bandas de la misma imagen y que resultaron de mayor utilidad en la diferenciación litológica fueron, en orden decreciente: 741  $\approx$  541, 742  $\approx$  542, 756, 521 y 123. Con ETM+123 las áreas yesosas se confunden con las clases temáticas lutita verde-yeso y lutita verde-caliza, y es un poco diferente a las calizas las cuales se presentan en tonos azul grisáceo en las tres imágenes. Con ETM+125, el área yesosa y la lutita verde-yeso se presentan en colores verdes, lutita verde-caliza en gris-azul, calizas en azules y lutitas rojas en azul diferente al de las calizas.

En la combinación ETM657 el piso de una cantera de yeso (Figura III.20) ubicada al oeste de la imagen, así como otras áreas desnudas en las que existe yeso, se manifiestan de color cian más intenso que otros suelos sin vegetación, como en las calizas o lutitas rojas (Figuras III.21 y III.22). Estos resultados concuerdan con lo encontrado en las

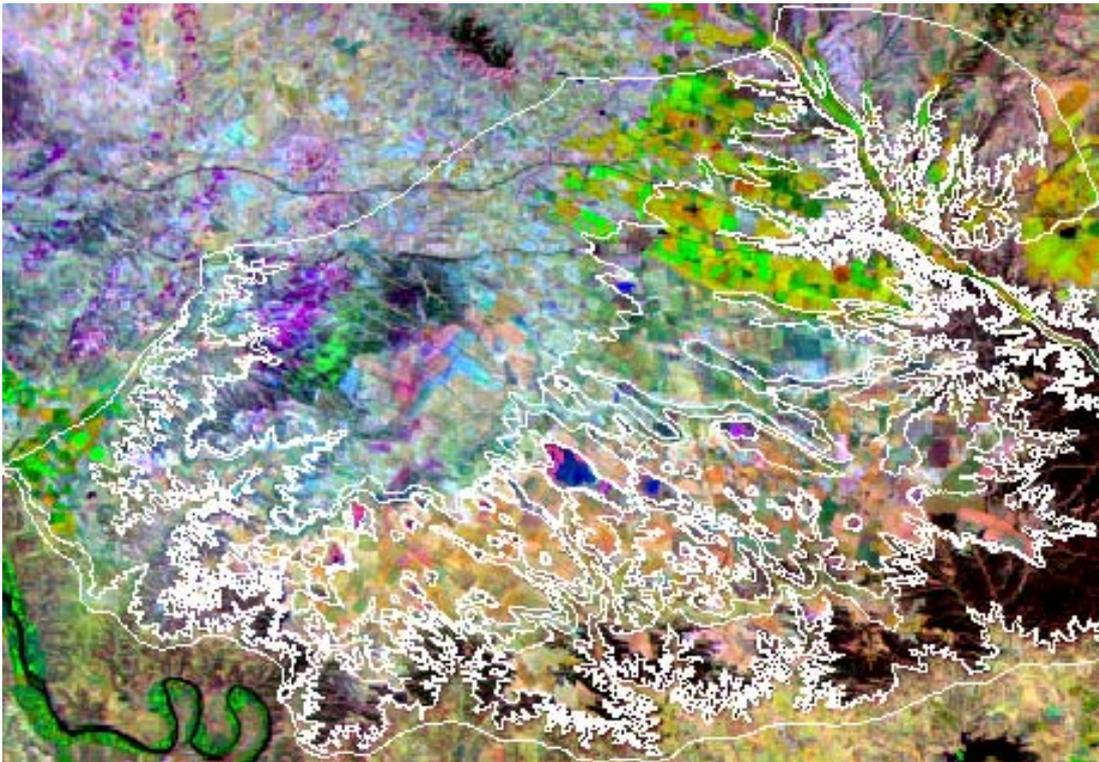
imágenes de Cedral con otras combinaciones de bandas 753, 752 y 751. Es decir no siempre se tiene el mismo color de las áreas con yeso con la misma combinación de bandas, lo cual se puede deber a las diferencias de relieve y vegetación entre las dos regiones. En Cedral la vegetación natural es herbácea y arbustiva; en Bujaraloz la topografía es más accidentada y en las áreas no abiertas a la agricultura hay vegetación natural arbórea y arbustiva en los claros, sobre todo en la Serreta Negra y en La Retuerta.



Figura III.20. Cantera de yeso en la Unidad Litológica yeso, caliza y lutita o clase temática yeso, Bujaraloz

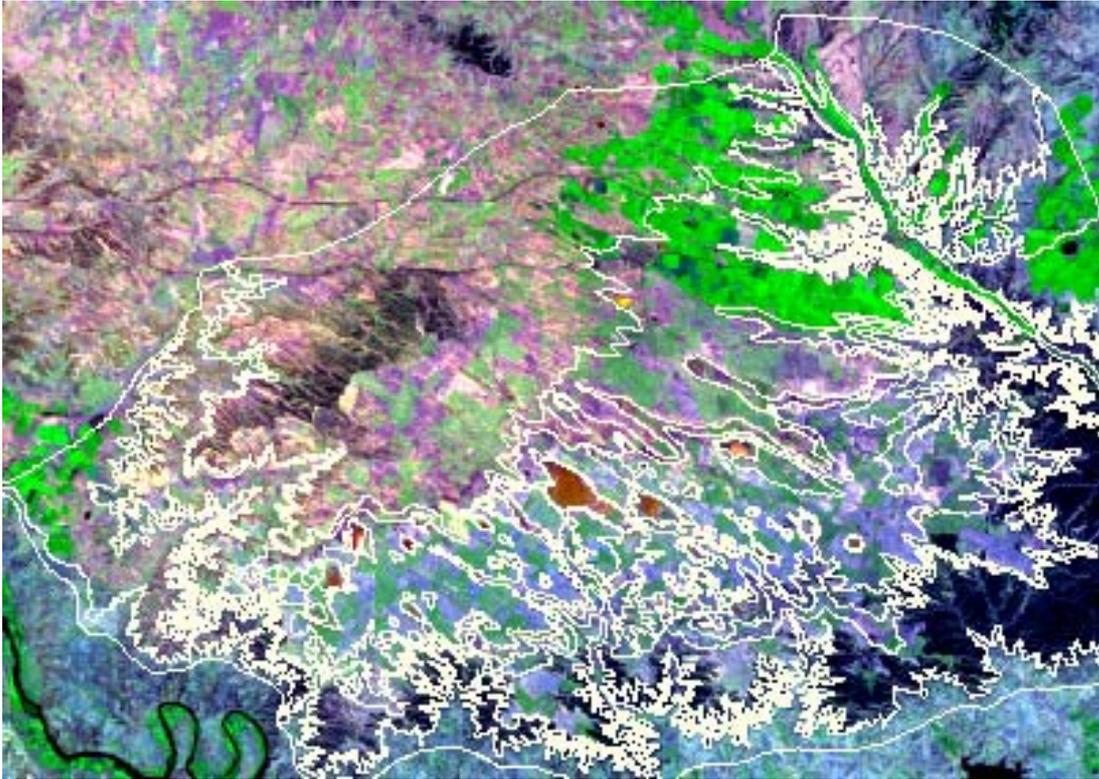


a) Agosto RGB = 741

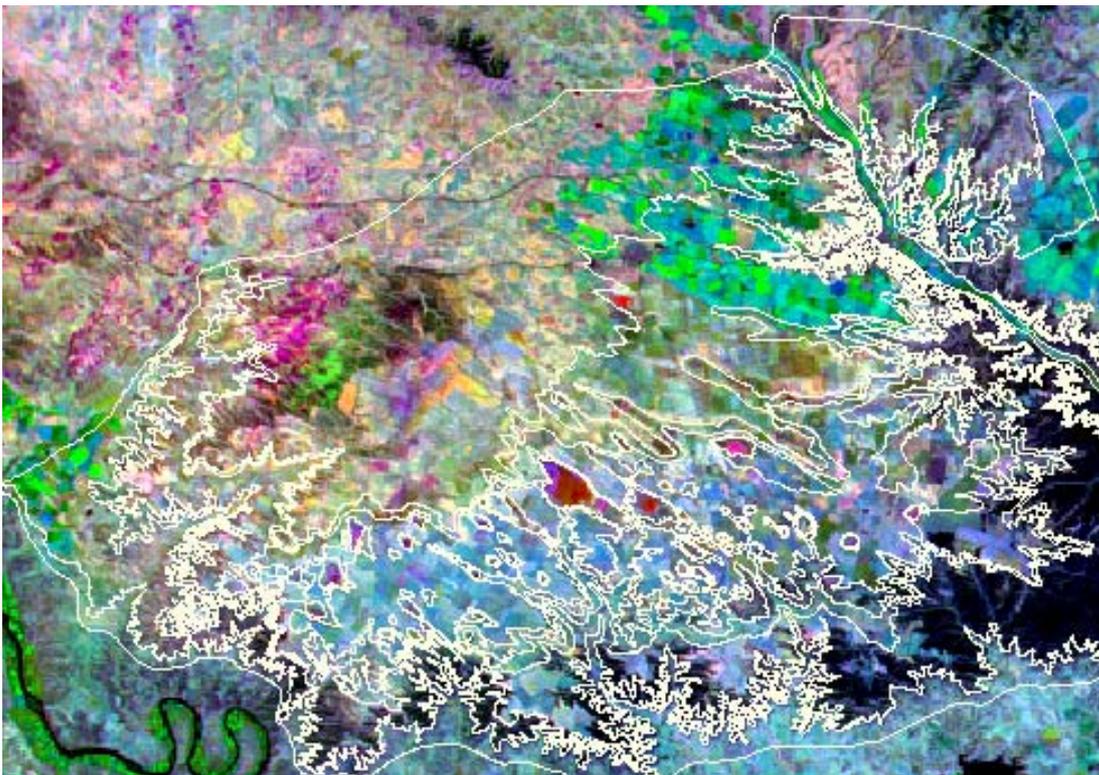


b) RGB =ETM7marzo, ETM4junio, ETM1agosto

Figura III.21. Combinaciones RGB741 (por imagen y multitemporal) de utilidad en el análisis visual, Bujaraloz.



Agosto RGB = 147



RGB: R=ETM1agosto, G=ETM4junio, B=ETM7marzo

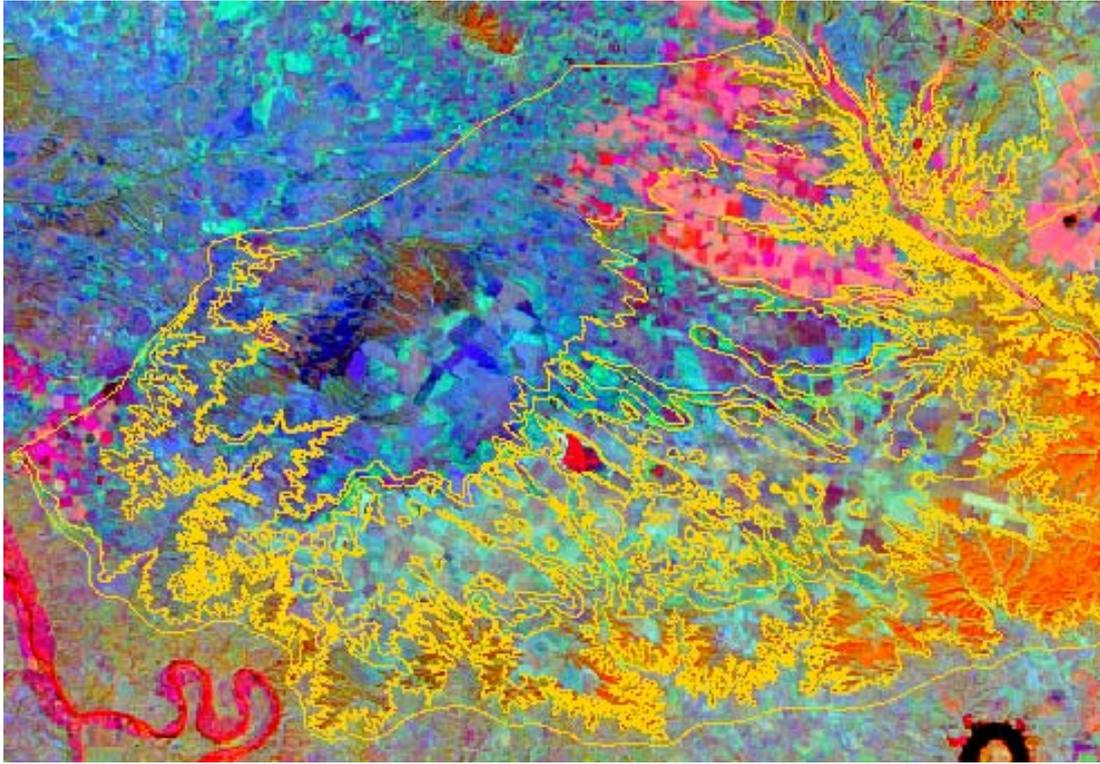
Figura III.22. Combinaciones RGB147 (por imagen y multitemporal) de utilidad en el análisis visual, Bujaraloz.

La combinación RGB 741 con diferente fecha fue la mejor para discriminar litologías, en ella el piso de la cantera de yeso se distingue bien, al igual que la zona de La Retuerta. Las combinaciones RGB 542, 742, 541 son similares a la composición 741. En general la discriminación litológica es mejor cuando se realiza análisis visual combinando bandas de diferente fecha (Figuras III.21 y III.22). Sin embargo se mantiene la confusión entre el yeso con las lutitas verdes\_yesos. Dicha confusión es lógica debido a que en la última clase temática lutitas verdes\_yesos existen áreas con yeso en el horizonte superficial, detectadas por el satélite y constatadas en campo. Solamente se diferencian donde se incrementa la densidad de la vegetación de pino en áreas de la clase temática lutita\_ yeso.

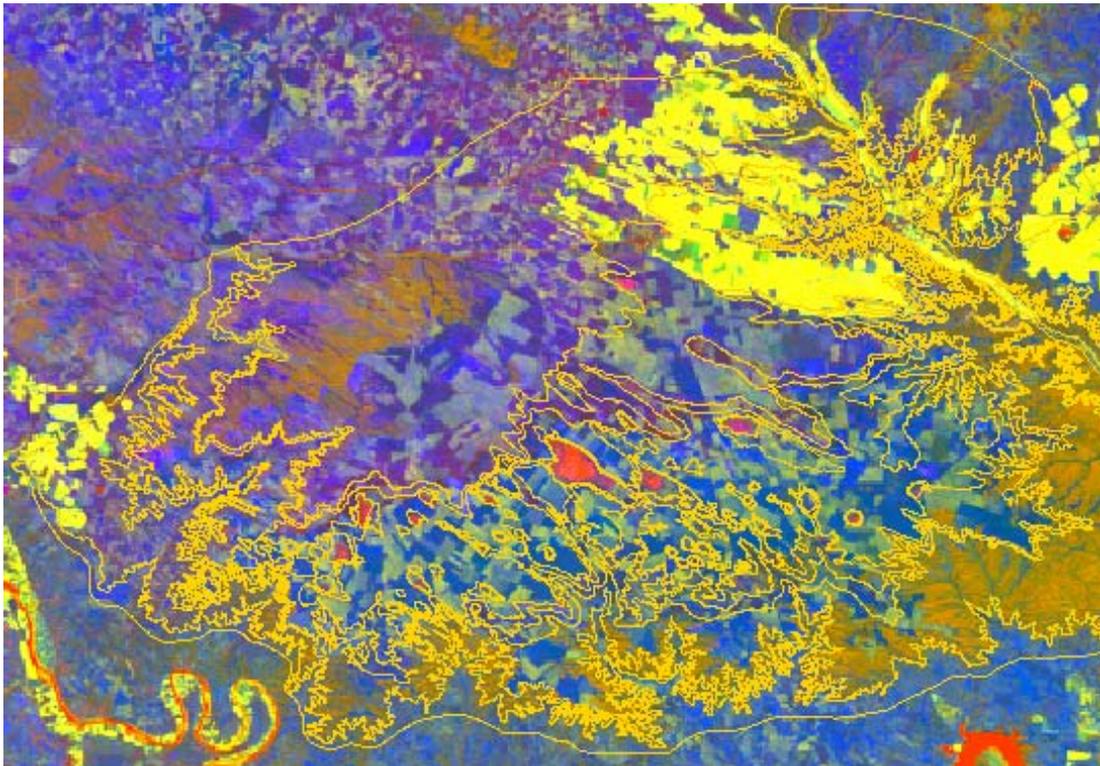
**6.3.1.3. Composición falso color con las transformaciones IHS y TC.** La discriminación de las litologías con la transformación de la imagen RGB a la forma IHS no mejoró, en comparación a la discriminación con RGB utilizando los mismos conjuntos de bandas. La transformación IHS147 resultó ligeramente mejor, pero solamente se tienen cambios de color (Figura III.23a) en comparación con RGB147. Los resultados fueron similares con la transformación Tasseled cap (Figura III.23b), en la cual visualmente las litologías se discriminan en forma parecida, en la mitad norte el yeso nuevamente se confunde con la lutita verde-yeso y con la lutita rojiza; a partir de la val Cenicera hacia el sur y el este se confunde con las calizas.

Al analizar por separado los índices TC, se aprecia que en TC1 (brillantez) el piso de la cantera de yeso se manifiesta en tonos claros en las tres imágenes; en la imagen de marzo el tono es igual al de las saladas, y en junio y agosto no se confunde con las saladas al ser éstas de tono grisáceo. Con TC2 (verdor) el piso de la cantera de yeso se presenta en tonos de gris pero sin diferenciarse de las demás litologías o de otros suelos desnudos; y con TC3 (humedad) es gris oscuro sin diferenciarse de otras áreas.

En la transformación Tasseled cap, el yeso es el más brillante, luego siguen la caliza y la lutita-arenisca; la caliza y lutita roja-yeso tienen el índice humedad más bajo. El yeso, la lutita verde-yeso y la lutita roja-yeso tienen los valores de verdor más bajos.



a) RGB = IHS=1junio,4agosto,7marzo



b) RGB = TC321 (humedad, verdor y brillo)

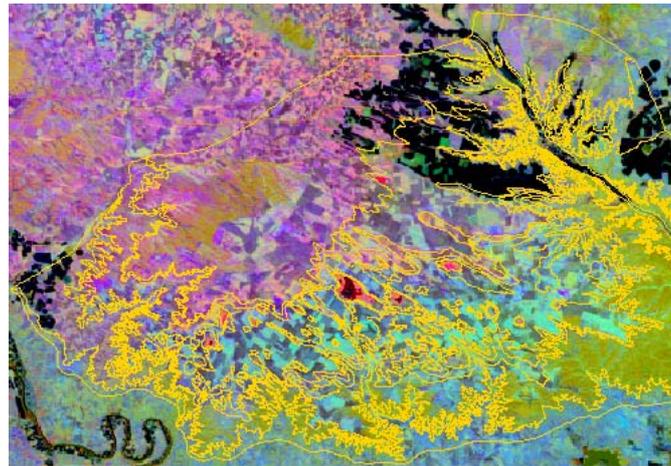
Figura III.23. Transformación IHS (a) y Tasseled cap (b) de la imagen de agosto, Bujaraloz

Al hacer agrupaciones de las litologías (Tabla III.5) la clase temática yeso-II y la lutita verde-yeso son las más brillantes; la lutita verde-yeso, la lutita roja-yeso y la lutita roja-II tienen el índice verdor más bajo; las clases caliza-II, lutita roja-yeso y lutita roja-II tienen el índice de humedad más bajo. En cuanto al índice de humedad, el yeso-II es más seco que la lutita verde-caliza, y ésta es menos húmeda que la lutita verde-yeso.

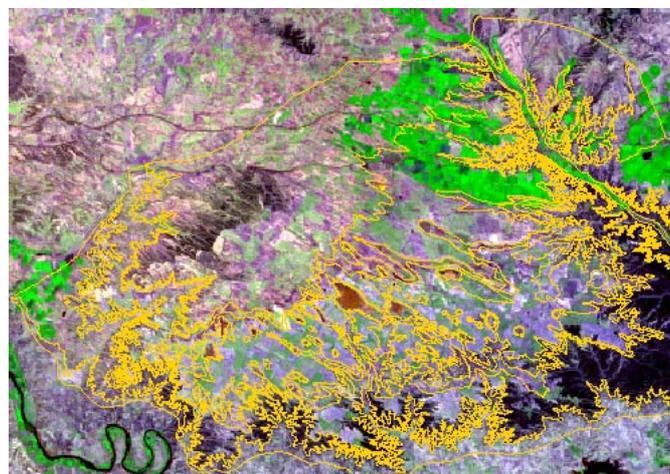
**6.3.1.4. Análisis de componentes principales (ACP).** En las CP1 y CP2 el yeso se presenta en tonos blancos confundiendo con lutita verde-yeso y con caliza, los tonos son más claros en marzo que en agosto y junio. En la CP3 el yeso y el piso de la cantera nuevamente son más blancos, y en marzo se invierte el tono entre caliza y lutita verde-yeso. La CP4 y CP5 son similares resaltando la zona de La Retuerta. Con la CP6 de la imagen de marzo la clase lutita verde-yeso se manifiesta en tonalidades oscuras y lutita verde-caliza en tonos claros.

En las composiciones RGB con CP123 o con CP145 las clases temáticas se discriminan en forma muy similar a las tenidas con las combinaciones RGB con las bandas en valores de reflectancia, o con las transformaciones IHS y TC; es decir se resaltan los mismos grupos de litologías y solamente cambia el color en el que se aprecian. Las áreas con yeso se confunden con las clases lutita verde-yeso, lutita verde-caliza y con caliza. Respecto al ACP, Chávez (1984, citado por Younis, 1993) dice que el análisis visual con las primeras tres componentes conlleva un aumento del ruido residual, dificultando el análisis visual, pudiendo ser este el caso.

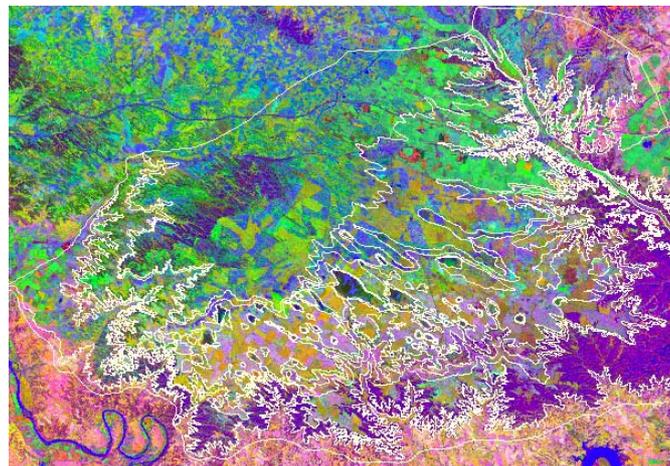
El análisis de componentes principales en dos grupos de bandas a) VI: bandas 1,2,3 y b) IR: bandas 5,7, y el análisis visual RGB con la CP2 de cada grupo y la banda 4, resultó en una ligera mejora en la discriminación de las clases temáticas, pero nuevamente se da la confusión entre el yeso y lutita verde-yeso, lutita verde-caliza y caliza (Figura III.24). Otros autores han tenido mejores resultados con la CP2 (Ferrero *et al.*, 2003; Martínez-Ríos y Monger, 2002; Younis, 1993), quienes dicen que la CP2 es más informativa debido a que recoge la información no común o menos estable. Sin embargo, con la CP2 las clases yeso, lutita verde-yeso y lutita verde-caliza se confunden con la clase regadío, lo cual no sucede al utilizar la CP1 de cada grupo.



a) RGB = CP321



b) RGB = CPVII, ETM4, CPIR1



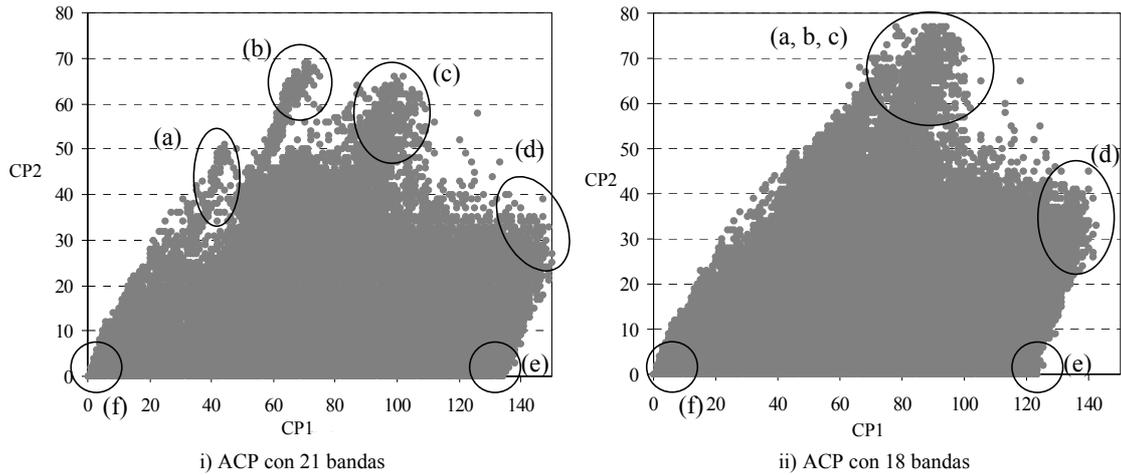
c) RGB = CPVI2, ETM4, CPIR2

Figura III.24. Composición RGB (a) de las componentes principales obtenidas con las siete bandas de la imagen de agosto, y divididas en dos grupos (Visible, VI, ETM123 e IR ETM5,7) utilizando (b) la CP1 de cada grupo, y (c) la CP2 complementados con la banda ETM4, Bujaraloz.

Los anteriores resultados concuerdan con Ferrero *et al.* (2003) quienes dicen que con las tres primeras componentes se distinguen más coberturas. También Younis (1993) encontró mayor contraste con las CP1 que con las CP2 del conjunto de seis bandas, y fue similar a las mejores composiciones en falso color (TM157, TM257 y TM357) con las bandas originales.

Al combinar entre fechas las CP obtenidas por grupos de bandas se mejora un poco la discriminación de la clase yeso. Por ejemplo en la combinación RGB con la CP2-VI de agosto, ETM+4 de agosto y CP1-IR de marzo la clase yeso sin vegetación se discrimina en color cian, aunque este tono también se presenta en ciertas áreas de caliza. En campo se comprobó que en algunas áreas de la clase caliza sí existe yeso; sin embargo, llegar a una conclusión definitiva exige un trabajo de campo detallado, ya que el tono cian no es exclusivo de los suelos desnudos ricos en yeso.

Con el objetivo de identificar los píxeles correspondientes a los elementos puros o “*endmember*” se graficaron varias combinaciones de las componentes principales; los resultados (Figura III.25), al igual que en Cedral, no permiten identificar elementos puros. Como en Cedral, los mejores resultados se tienen cuando en el análisis de componentes principales se incluye la banda térmica, aunque en Bujaraloz la identificación de píxeles puros fue ligeramente mejor en la imagen multitemporal incluyendo la banda térmica (ACP con 21 bandas). Aún así la discriminación no es satisfactoria (Figura III.25), considerándose estos resultados inferiores a los de Cedral. Tanto en Cedral como en Bujaraloz se tienen mejores resultados en la identificación de “*endmembers*” al relacionar la CP1 con la CP2 lo cual coincide con Bryant (1996), pero no con White y Drake (1993) quienes encuentran mejores resultados gráficos con las CP2 y CP3.



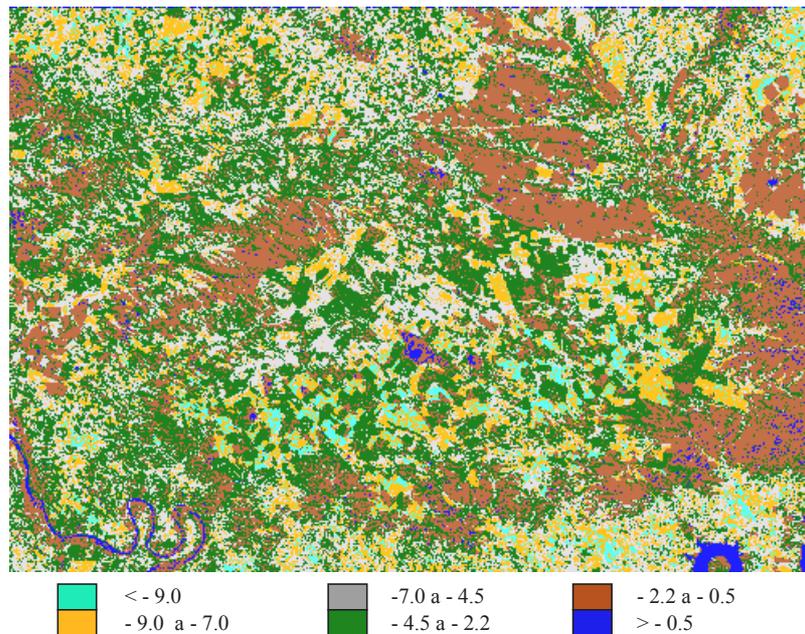
Endmembers: (a) Regadío y sombras en Serreta Negra, (b) Regadío, (c) Áreas húmedas, (d) Agricultura de secano, saladas secas, (e) Agricultura de secano con alta reflectancia y (f) Río Ebro

Figura III.25. Dispersogramas del ACP con (i) y sin (ii) la banda térmica mostrando los píxeles de mayor pureza (“endmembers”) de alguna cobertura o condición del terreno, Bujaraloz.

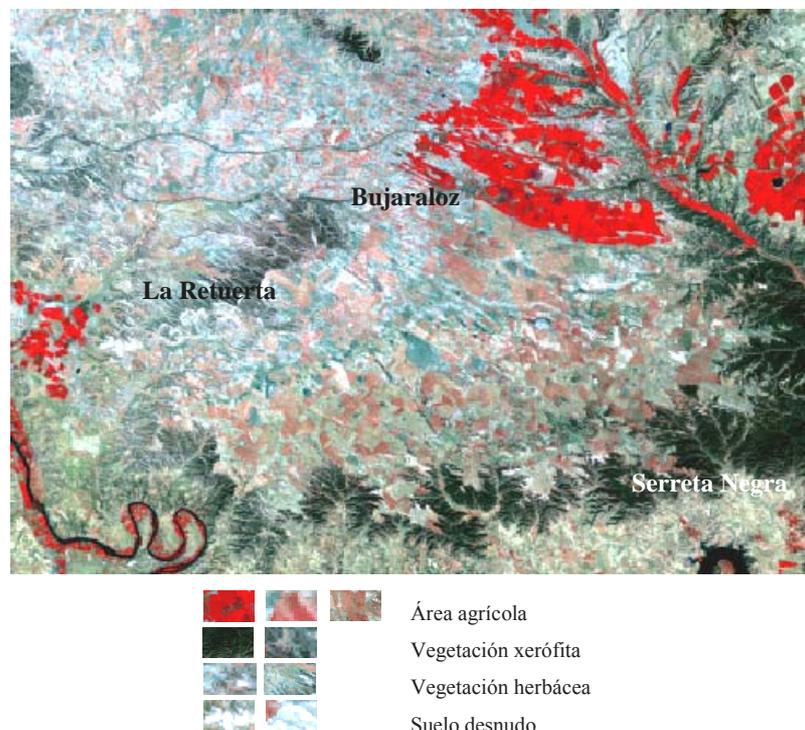
Los resultados menos satisfactorios en Bujaraloz, frente a los de Cedral, se deben a la mayor complejidad de los componentes del paisaje, terreno más accidentado y poca superficie con alto contraste espectral entre las litologías. Los resultados en Bujaraloz son menos satisfactorios a los Bryant (1996) y de White y Drake (1993). En Bujaraloz hay mayor diversidad en el paisaje pero, quizás, con menor contraste espectral al del estudio de Bryant (1996), quien trabajó en parte de un “chott” de Túnez con superficie plana y relativamente suave, sin sombras, escasa vegetación (precipitación media anual de 80-140 mm), y constituida principalmente por tres minerales evaporíticos halita, carnalita y yeso, con propiedades espectrales diferentes entre sí. En cambio el área estudiada por White y Drake (1993) tiene mayor variabilidad en la litología encontrando dolomitas, calizas, areniscas, yeso, depósitos de arcilla, etc., así como mayor contraste espectral al tenido en Bujaraloz.

La falta de contraste espectral entre los componentes del paisaje se constata en la tendencia de reconocer solamente las áreas con mayor diferencia espectral, como son las sombras y regadío en Cedral; regadío, sombras, áreas húmedas y agua (río Ebro) en el ACP con las 21 bandas en Bujaraloz (Figura III.25). En la Figura anterior se aprecia que la banda térmica ayuda a diferenciar algunas clases, sin embargo la clase temática yeso, de interés en el presente trabajo, sigue sin discriminarse de las otras clases.

**6.3.1.5. Índice de yeso, IY.** En las imágenes obtenidas aplicando la fórmula de Neville *et al.* (2000), no se logra discriminar los suelos yesosos o las litologías con yeso. La clase yeso se confunde con las áreas agrícolas en barbecho o con vegetación natural poco densa. En las tres imágenes se aprecia la influencia lógica de la vegetación tanto cultivada como natural en el índice de yeso superficial (Figura III.26).



a) Índice de yeso superficial



b) Composición falso color, RGB432.

Figura III.26. Índice de yeso superficial, imagen de agosto, Bujaraloz.

En general, las áreas con escasa cubierta vegetal o sin ella tienen valores bajos ( $IY < -6.0$ ); sin embargo, el yeso presenta un amplio intervalo de valores ( $-3.0 > IY > -9.0$ ) confundible con otras áreas o con Unidades Litológicas sin yeso. Además, se aprecia tendencia a confundir las zonas yesosas desnudas o con vegetación, con zonas agrícolas o con vegetación natural. Los valores de IY en lutita y/o caliza por lo general son más bajos que los de las áreas yesosas ( $IY < -8.0$ ). De acuerdo a lo anterior, en áreas sin vegetación el índice de yeso apoyado en información de campo y/o laboratorio puede ser útil para discriminar áreas yesosas de las no yesosas.

Al relacionar los valores absolutos del índice de yeso con la reflectancia para píxeles seleccionados por clase temática, al igual que en Cedral, se aprecia tendencia a disminuir el índice cuando se incrementa la reflectancia y la longitud de onda (número de banda). Así en la imagen de marzo para la clase yeso y bandas 1 a 5 y 7 la  $R^2$  es 0.58, 0.64, 0.72, 0.33, 0.85 y 0.95, respectivamente; para la clase lutita verde y caliza la  $R^2$  disminuye a 0.001, 0.02, 0.11, 0.17, 0.18 y 0.40, respectivamente. Dicha tendencia se aprecia más en las imágenes de marzo y junio, pero la tendencia es menor en lutitas o calizas a pesar de que como indica Chuvieco (2002) los carbonatos incrementan la reflectancia. En la Figura III.27 de la imagen de marzo se presenta la tendencia en la clase yeso y bandas ETM+1, 3, 5 y 7.

El incremento de la relación del IY con las bandas desde el visible al infrarrojo medio, quizás se deba a que en ese orden se incrementa el valor del coeficiente utilizado en el cálculo del IY. Así, el coeficiente utilizado en ETM1 es 0.147 y en ETM7 es 0.857, por ello el coeficiente de terminación ( $R^2$ ) resulta menor en ETM1 y mayor en ETM7. De cualquier modo para estar seguros de la utilidad o no del índice de yeso es necesario obtener los coeficientes para cada imagen y no utilizar los generados para otras regiones. Además debe incluirse información del suelo, ya que características del mismo como la textura, la estructura y el contenido de humedad están muy relacionadas con la reflectancia. Así un suelo arenoso tiene estructura débil, bajo contenido de humedad y mayor reflectancia (Chuvieco, 2002) que un suelo arcilloso.

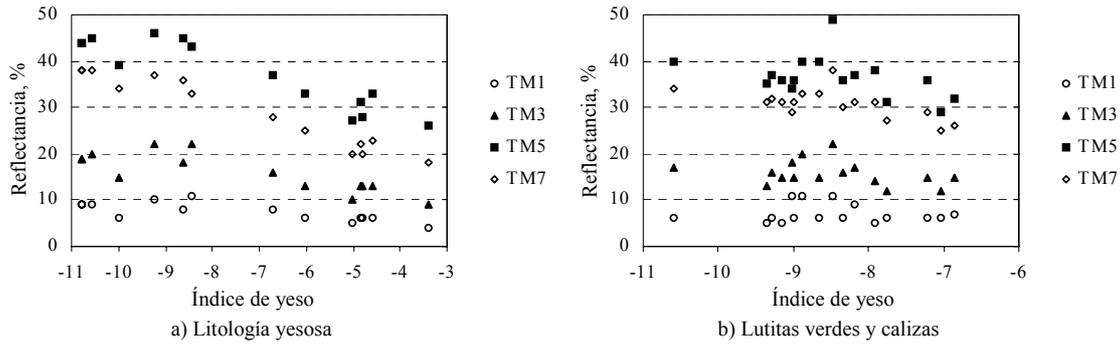


Figura III.27. Relación entre el índice de yeso y la reflectancia para algunas bandas, imagen de marzo, Bujaraloz.

### 6.3.2. Clasificación supervisada de las imágenes Landsat.

Se hizo clasificación supervisada en el área de estudio completa y en las áreas desnudas o desprovistas de vegetación. Los resultados obtenidos son los siguientes.

**6.3.2.1. Subescena completa.** De las tres clasificaciones supervisadas (por imagen, con dos y con tres imágenes) de las imágenes sin máscara, los mejores resultados correspondieron a la clasificación con las tres imágenes y con la litología agrupada en seis clases más las áreas húmedas y el regadío. En la clasificación multitemporal con las tres imágenes y 14 clases (Tabla III.1, III.5 y III.13) la fiabilidad global (FG) es de 0.6 y el índice kappa general ( $\kappa$ ) de 0.55, éste último estadístico indica una buena concordancia entre la clasificación espectral y la verdad terreno (Fitzgerald y Lees, 1994).

La clase lutita-arenisca tiene una excelente concordancia clasificación-mapa (verdad terreno) con  $\kappa$  de 0.92 y una exactitud de identificación (EI) del 93.4 % (Tabla III.13); la clase lutita verde-yeso también presenta una excelente concordancia clasificación-mapa al tener un  $\kappa = 0.8$  y una EI = 85 % altos. La clase lutita verde-yeso tiene buena concordancia con  $\kappa = 0.45$  y EI del 51.8 %. El yeso se tiene pobre concordancia ( $\kappa = 0.16$ ) con EI = 21 % y 30 % de exactitud cartográfica (EC); la clase lutita roja-yeso tiene EI = 13 % y  $\kappa = 0.1$ .

Al analizar la exactitud de identificación, la clase lutita verde-caliza se confunde un 28.2 % con la clase lutita verde-yeso, algo lógico pues ambos tienen lutita verde como litología principal. En cambio la clase lutita verde-yeso solamente se confunde un 7.7 % con el yeso y un 2.4 % con lutita rojiza, de ahí su alto valor de FG y de  $\kappa$ . La clase lutita roja-yeso se confunde un 46.6 % con la clase lutita-arenisca debido al predominio de las lutitas rojas en ambas litologías; también se confunde un 10.7 % con lutita rojiza. El yeso se confunde un 42 % con la clase lutita verde-yeso, un 15.2 % con lutita rojiza y un 8.6 % con lutita verde-caliza. Las anteriores confusiones confirman los resultados del análisis visual respecto a la confusión entre estas clases temáticas.

Tabla III.13. Resumen de la matriz de confusión de la clasificación supervisada con 14, 12 y 8 clases, incluyendo las clases regadío y áreas húmedas, Bujaraloz

Clase litológica	14 clases			12 clases			8 clases		
	EI	EC	$\kappa$	EI	EC	$\kappa$	EI	EC	$\kappa$
Lutita verde-caliza	51.77	55.84	0.45	51.12	58.51	0.45	48.08	58.90	0.41
Margocaliza	97.42	96.85	0.97	97.42	96.85	0.97	95.76	97.92	0.95
Caliza	50.73	78.76	0.47	48.44	83.50	0.45			
Lutita roja-yeso	12.95	28.72	0.10	17.45	42.94	0.15			
Yeso	21.13	29.97	0.16	22.58	26.45	0.16			
Lutita roja	25.23	33.69	0.23	25.21	33.69	0.23			
Lutita-arenisca	93.37	61.95	0.92	92.64	62.95	0.92			
Lutita verde-yeso	85.08	51.66	0.80	84.75	52.36	0.79	86.72	56.39	0.82
Caliza-lutita	70.94	76.51	0.69	71.84	77.20	0.70			
Lutita rojiza	45.93	46.44	0.41	44.57	47.71	0.40			
Yeso depresión	18.27	40.44	0.17						
Aluvión	34.31	44.94	0.33						
Regadío	100.00	98.83	1.00	100.00	99.90	1.00	100.00	99.80	1.00
Áreas húmedas	100.00	97.54	1.00	100.00	97.54	1.00	100.00	97.54	1.00
Caliza-II*							57.51	79.17	0.51
Lutita roja-II**							68.90	68.29	0.58
Yeso-II***							24.82	31.38	0.18
Fiabilidad global, FG		0.60			0.61			0.67	
Índice kappa, $\kappa$		0.55			0.56			0.60	
DT		1999.8			1999.7			1999.3	
JM		1383.8			1385.3			1371.5	

\* = Agrupación de Caliza + Caliza-lutita

\*\* = Agrupación de Lutita-arenisca + Lutita roja-yeso + Lutita roja + Lutita rojiza

\*\*\* = Yeso total = agrupación de Yeso + Yeso depresión

EI = Exactitud de identificación, EC = Exactitud cartográfica, DT = Divergencia transformada,

JM = Distancia de Jeffries Matusita

Con el fin de disminuir las confusiones se hicieron agrupaciones de Unidades Litológicas, eliminando algunas (Tabla III.5). Younis (1993) también agrupó litologías, y de 17 clases iniciales se quedó con 6 de acuerdo a la roca dominante. Para la misma área de estudio del presente trabajo, Los Monegros Sur, Koch (2000) mediante la técnica de “*endmember*” y componentes principales solamente considera cuatro grupos de suelos: con yeso, con caliza y dos mezclados sin aclarar su composición.

En el presente trabajo antes de agrupar las unidades litológicas en 6 clases, se efectuó la clasificación supervisada con 12 clases temáticas, para lo cual la clase aluvión por estar prácticamente toda ella en riego, se incluyó en la clase regadío; la clase yeso depresión se agrupó con la clase yeso. Con estas modificaciones, la fiabilidad global e índice kappa mejoraron muy poco, tampoco hubo mejoras significativas en la separación entre las clases. En general las confusiones son las mismas que cuando se hace la clasificación digital con 14 clases (Tabla III.13).

Posteriormente las Unidades Litológicas se agruparon en seis clases según roca dominante (Tablas III.5 y III.13), obteniendo aumento de FG y  $\kappa$  general. Se mejora un poco los valores de los estadísticos para la clase lutita verde-yeso y para el yeso-II, pero disminuyen un poco los de lutita verde-caliza, aún así siguen siendo valores aceptables. Se mantiene la misma relación de confusión aunque disminuye un poco su valor, por ejemplo el yeso-II se confunde un 41 % con lutita verde-yeso, un 19.5 % con lutita roja-II y un 8.4 % con lutita verde-caliza y con caliza-II. En síntesis el yeso-II se confunde con la litología lutita verde-yeso y con caliza-II.

La temperatura de la clase yeso en la imagen de agosto es igual a la de lutita verde-caliza (41.8 °C), en junio la temperatura del yeso y la caliza son casi iguales (35.1 y 35.3 °C, respectivamente), y en marzo la del yeso es ligeramente inferior a ambas clases (lutita verde\_caliza con 24.6, caliza con 24.2 y yeso con 23.8 °C). La temperatura se ve afectada por la vegetación, humedad, materia orgánica, minerales, entre otros, información inexistente para el área estudiada; sin embargo la temperatura por sí sola no explica la confusión entre estas litologías, siendo necesario estudios espectrales con información de campo y de laboratorio para poder explicar su confusión y por ende su discriminación.

La clasificación digital con dos imágenes o por imagen da resultados menos satisfactorios que los anteriores. Por ejemplo, con las imágenes de junio + agosto y catorce clases (Tabla III.14) la FG es de 0.56 y  $\kappa$  de 0.52, valores menores a los de la Tabla III.11. En la clasificación supervisada de la imagen de junio la FG fue de 0.48 y  $\kappa$  de 0.43, y para agosto de 0.50 y de 0.45, respectivamente.

Tabla III.14. Resumen de la matriz de confusión de la clasificación supervisada con 14 clases por imagen de junio y agosto y juntas, Bujaraloz.

Clase temática	Imágenes								
	Junio			Agosto			Junio + Agosto		
	EI	EC	$\kappa$	EI	EC	$\kappa$	EI	EC	$\kappa$
Lutita verde-caliza	33.4	36.8	0.25	31.7	49.3	0.23	42.1	49.5	0.35
Margocaliza	94.3	96.9	0.94	84.4	92.3	0.83	97.1	96.1	0.97
Caliza	51.9	71.9	0.48	43.6	60.3	0.40	53.6	78.6	0.50
Lutita roja-yeso	12.2	24.0	0.10	7.4	13.7	0.05	10.7	22.9	0.08
Yeso	14.1	24.0	0.08	23.0	21.5	0.18	17.3	28.3	0.12
Lutita roja	13.5	37.1	0.11	24.5	47.4	0.22	21.0	35.9	0.18
Lutita-arenisca	80.4	58.5	0.78	81.6	58.7	0.79	91.0	55.3	0.90
Lutita verde-yeso	81.0	31.5	0.74	83.6	31.4	0.78	85.1	44.3	0.80
Caliza-lutita	71.7	63.8	0.70	46.2	51.9	0.43	72.0	74.7	0.70
Lutita rojiza	44.6	30.0	0.40	45.1	55.4	0.40	54.0	54.1	0.50
Yeso depresión	5.5	25.5	0.04	7.5	19.6	0.06	10.5	26.3	0.09
Aluvión	20.4	42.7	0.19	29.4	43.1	0.29	36.1	52.8	0.35
Áreas húmedas	100.0	83.3	1.00	100.0	78.2	1.00	100.0	78.1	1.00
Regadío	99.5	86.3	0.99	99.8	99.3	1.00	100.0	98.9	1.00
FG	0.48			0.50			0.56		
$\kappa^*$	0.43			0.45			0.52		

Exactitud de identificación (EI) y cartográfica (EC); Fiabilidad global (FG); Índice kappa general ( $\kappa^*$ ) y por clase ( $\kappa$ ).

Los resultados no fueron satisfactorios para la clase yeso, siendo mejores en la imagen de agosto. Para dicha clase la EI en la imagen de junio fue de 14.1, en la de agosto de 23 y cuando se clasifican juntas de 17.3. Para el yeso los valores de  $\kappa$  fueron de 0.08, 0.18 y 0.12, respectivamente (Tabla III.14). Cuando las imágenes de junio y de agosto se clasifican juntas y con 12 clases en vez de 14, solamente se incrementa en 1 % los estadísticos FG y  $\kappa$  (0.58 y 0.53, respectivamente) lo cual no representa mejora en la clasificación.

Estos resultados concuerdan con lo apreciado visualmente en las composiciones RGB respecto a que a partir de la val Cenicera es difícil separar el yeso por la influencia de la caliza y por el relieve menos accidentado. Desde esta val hacia el norte la confusión se presenta principalmente con lutita verde-yeso y lutita verde-caliza, en donde se tiene mayor cobertura vegetal y el terreno es más accidentado. Sin embargo, estos resultados relativamente pobres, no lo son ya en áreas donde se clasificó yeso fuera de la Unidad Litológica yeso y yeso depresión, se constató en campo la existencia de yeso superficial, principalmente del tipo nodular.

En la clase temática yeso conforme se avanza de Oeste a Este se incrementa la proporción de calizas en el horizonte superficial hasta su predominio sobre el yeso (Salvany *et al.*, 1996; Koch, 2000). Así el yeso, por lo general nodular, en el horizonte superficial constituye un 5 % o menos, por lo tanto la reflectancia de estas áreas más parecida a la de la calcita que a la del yeso clasificándose como caliza o lutita verde-caliza. Quizá la separabilidad yeso-caliza sea mayor al eliminar de la Unidad Litológica yeso el área que se confunde con la caliza a partir de la val Cenicera. En este trabajo no se hizo la separación porque uno de los objetivos es indagar la discriminación del yeso de otras litologías.

La presencia de yeso se comprobó en las clases temáticas lutita verde-yeso, lutita verde-caliza, caliza, lutita roja y lutita rojiza. En algunas áreas de yeso en la parte Este y en las áreas donde la caliza predomina sobre el yeso en la superficie se detectó yeso solamente cuando se redujo el número de clases a doce y a ocho.

Asimismo, la vegetación de sabina y pino enmascaran las áreas yesosas al Sureste de la salada Amarga Baja, estas áreas espectralmente se parecen a la clase margocaliza y por

tal razón se clasifican como tal. Además de la vegetación y rocas calizas, también se subestima el yeso debido a otros factores, por ejemplo depósitos limo-arcillosos sobre el yeso que interfieren en su firma espectral. Por otro lado, se sobreestima el yeso debido a pedregosidad, a color claro del suelo (luminosidad alta, “*value*”), a presencia de sello, a costra, o parte superior de lomeríos suaves; factores causantes de respuestas espectrales semejantes a las de áreas de yeso. De las interferencias anteriores la más importante es el color del suelo, y según Post *et al.* (2000), Matthias *et al.* (2000) y Schmidt y Karnieli (2001) el color es uno de los principales factores que afectan la reflectancia.

Al comparar el índice de brillo de la transformación Tasseled Cap con el “*value*” (Munsell) en las áreas con tonalidades claras en las imágenes de las clases temáticas que se confunden con el yeso, se tiene que las clases yeso y lutita verde-yeso presentan el índice de brillo (Tasseled cap) medio de las tres imágenes más alto (75.3 y 75, respectivamente), y el más bajo es el de la caliza (67.4). El valor de la luminosidad o “*value*” (tabla de colores Munsell) que predomina para el yeso es de 8 y para las lutitas y calizas de 6 ó de 7 (Anexo III.1).

Respecto al índice de humedad, el valor más alto es para la clase lutita roja (-15.9), luego están lutita verde-yeso (-17.3) y el yeso (-17.6); los valores más bajos son para las clases lutita verde-caliza (-22.3) y la caliza (-23.6). En relación al índice de verdor, la clase lutita roja tiene el valor más alto (5.1), le sigue la caliza (1.5), el yeso (1.05) y lutita verde-yeso y lutita verde-caliza con 0.9. En resumen, las clases temáticas yeso, lutita verde-yeso y lutita verde-caliza en los tres índices tienen valores consecutivos y algunas veces solamente con ligera diferencias. Esta similitud en los índices TC junto con la temperatura ayuda a explicar la confusión de estas litologías. La confusión del yeso con la caliza se explica por la presencia de ésta en la superficie, que aunado a la disminución del “*value*” del yeso, hace que dichas áreas de la Unidad Litológica yeso se clasifiquen como caliza.

Otro hecho importante que resalta la fiabilidad de la clasificación y sobre todo de la utilidad de las imágenes Landsat ETM+, es el haberse detectado yeso en áreas en las que no se pensó que existiría en cantidad suficiente como para influir en la imagen, es decir, en el fondo de algunas saladas; tal como en la N° 37 y en Valdefrancín (Figura III.28). Aunque la salada Valdefrancín se localiza dentro de la Unidad Litológica Yesocaliza-lutita (Salvany *et al.*, 1996) o clase temática yeso, el yeso solamente aflora en los escarpes del barranco, debajo de capas de caliza y lutita.

Como además el suelo superficial del fondo y de los alrededores de la salada no tiene yeso pero sí material aluvial limoso, como se aprecia en la salada recién labrada (Figura III.27), en un inicio se pensó que la apariencia blanca del fondo era ocasionada por compuestos diferentes al yeso, tales como cloruro de sodio común en otras saladas.

Sin embargo, estas saladas se clasificaron como yeso debido a que en el fondo se desarrolla tapiz algal y sobre él se deposita una capa muy fina formada por yeso (identificado como tal mediante MEB y análisis cualitativos y semicuantitativos con EDS) posiblemente de origen sedimentario y depositado al evaporarse el agua (Figura III.28). De acuerdo a la presencia del tapiz algal, yeso depositado y sin labrar en el año 2003, es muy posible esta fuera la condición del terreno en la fecha de las imágenes, haciendo factible su discriminación espectral. Cuando el terreno está labrado cambian las características espectrales del suelo, haciendo muy difícil su clasificación espectral dentro de la clase yeso, lo más probable es que se hubiera clasificado como caliza, ya que una vez labrado tiene más similitud con esta clase.

**6.3.2.2. Clasificación supervisada en el área sin vegetación.** En la máscara de la imagen de agosto con el NDVI quedó poca superficie de las clases lutita verde-caliza, lutita roja y caliza, y desaparecen las clases margocaliza, lutita roja-yeso, aluvión, y caliza-lutita debido a la presencia de vegetación en dichas áreas. De la clase yeso depresión solamente permanecen algunas áreas en la cercanía de las saladas debido a la humedad y/o presencia de sales. Por tales razones únicamente se pudieron generar ocho clases como máximo incluyendo las áreas húmedas. Con ocho clases la FG es de 0.50 y  $\kappa$  general de 0.42 (Tabla III.15).

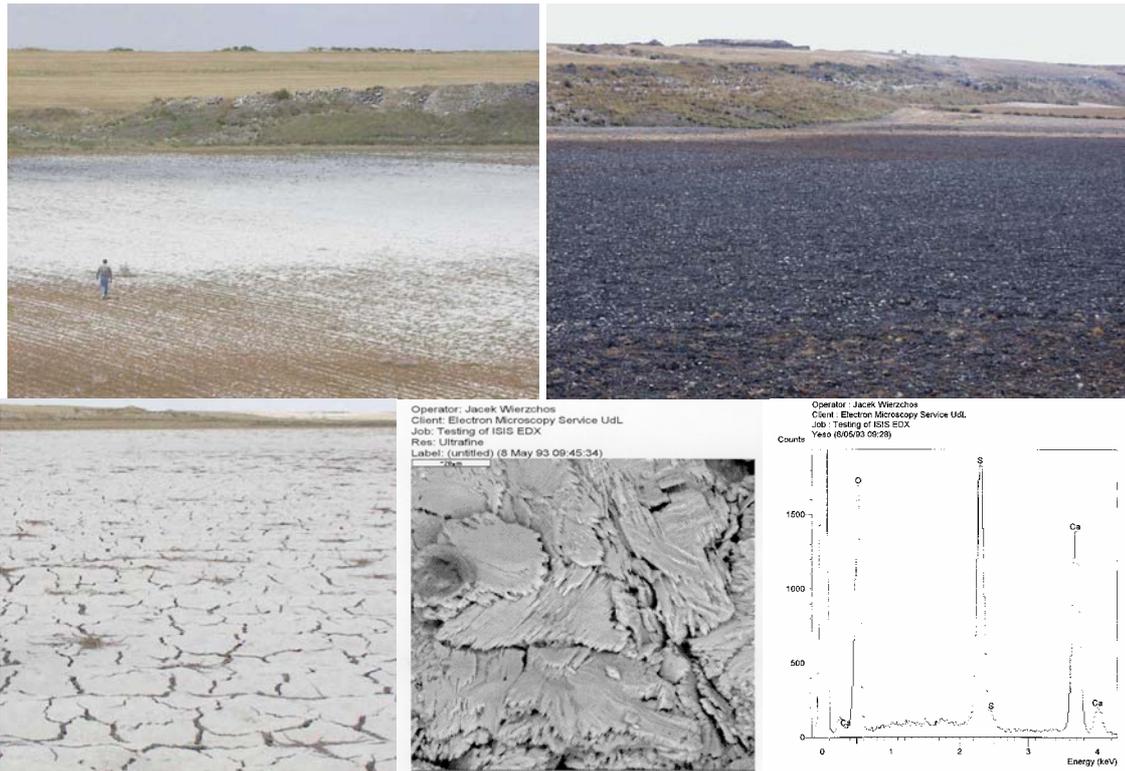


Figura III.28. Salada Valdefrancín antes y después de ser labrada, tapiz algal y acercamiento a 25 mm de distancia con MEB a 8 mm de distancia, y gráfica de la composición característica del yeso (espectrómetro de dispersión de energía de los rayos X, EDS), Bujaraloz

La clase áreas húmedas presentan la mayor EI (99.9) siguiéndole la lutita-arenisca (90.8). El yeso ocupa el cuarto lugar con un 46.7 % (Tabla III.13). Los valores son superiores a los tenidos con la imagen multitemporal clasificada con ocho clases, y a los de la imagen de agosto sin máscara (Tabla III.13). De acuerdo a la EI el yeso se confunde un 24.7 % con la clase lutita verde-yeso, un 10.1 % con lutita rojiza y únicamente un 4.3 % con lutita verde-caliza y con caliza. Es decir se repite el comportamiento de la clasificación con la imagen completa, aunque se duplica la exactitud del yeso, lo cual es de esperar ya que disminuye la superficie de la caliza con la cual se confunde. La clase lutita verde-yeso se confunde un 18.9 % (EI) con la lutita rojiza y un 10 % con lutita verde-caliza. La lutita verde-caliza se confunde un 32.5 % con la lutita verde-yeso.

Al clasificar la imagen con seis clases (sin las clases caliza y lutita-arenisca por tener muy poca superficie) la FG se incrementa a 0.59 y  $\kappa$  a 0.5 (Tabla III.13). La EI de las clases área húmeda, lutita rojiza y lutita-arenisca permanece sin cambios,

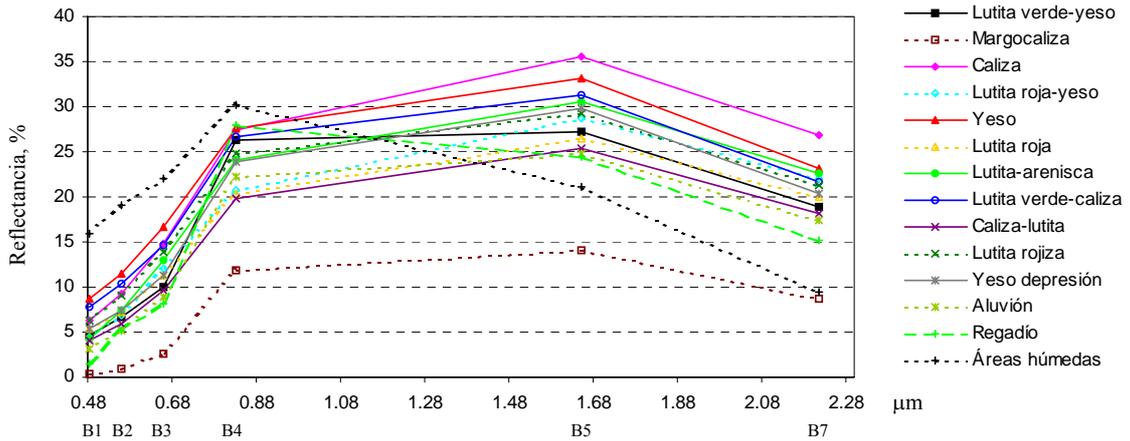
incrementándose un poco en la última. La EI del yeso aumenta un 3 %, la lutita verde-yeso un 13.4 % y la lutita verde-caliza solamente se incrementa un 1 %. El yeso se confunde un 27 % con lutita verde-yeso, un 11.5 % con lutita rojiza y un 5.9 % con lutita verde-caliza. La clase lutitas verde-caliza se confunde un 40.1 % con lutita verde-yeso.

La confusión entre las clases lutita verde-caliza y lutita verde-yeso se debe a que tienen firma espectral similar en la imagen de agosto (Figura III.29), por estar conformadas por los mismos tipos de rocas variando solamente la importancia de las dos últimas; Además la temperatura es prácticamente la misma (42.3 y 42.2 °C, respectivamente). El yeso se confunde con estas últimas dos clases debido a que forma parte de dichas unidades cartográficas y además la unidad yeso incluye calizas y lutitas como litologías secundarias (Tabla III.1).

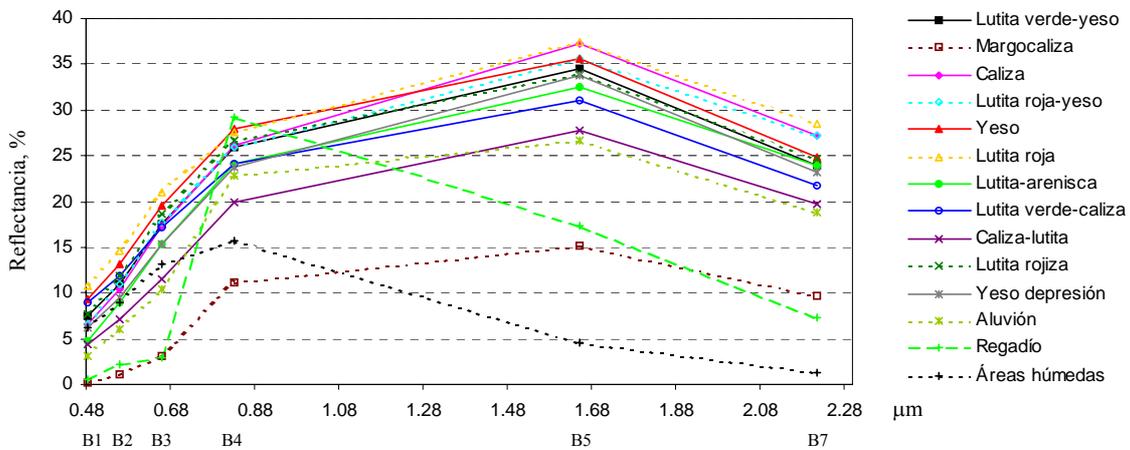
Tabla III.15. Resumen de la matriz de confusión de la clasificación supervisada en la máscara de la imagen de agosto, Bujaraloz.

Clase temática	Ocho clases			Seis clases		
	EI	EC	$\kappa$	EI	EC	$\kappa$
Lutita verde-yeso	39.6	25.4	0.2	53.0	37.5	0.3
Lutita verde-caliza	35.8	50.6	0.3	36.9	72.6	0.2
Yeso	46.7	35.6	0.4	49.2	50.0	0.4
Lutita rojiza	53.7	26.7	0.5	54.1	41.5	0.5
Lutita roja	40.3	59.9	0.3			
Lutita-arenisca	90.8	92.3	0.9	92.0	92.9	0.9
Caliza	19.8	50.0	0.2			
Área húmeda	99.9	77.4	1.0	99.9	77.4	1.0
Fiabilidad global, FG		0.50			0.59	
Índice kappa, $\kappa$		0.42			0.50	
DT		1640.0			1607.9	
JM		1206.9			1201.0	

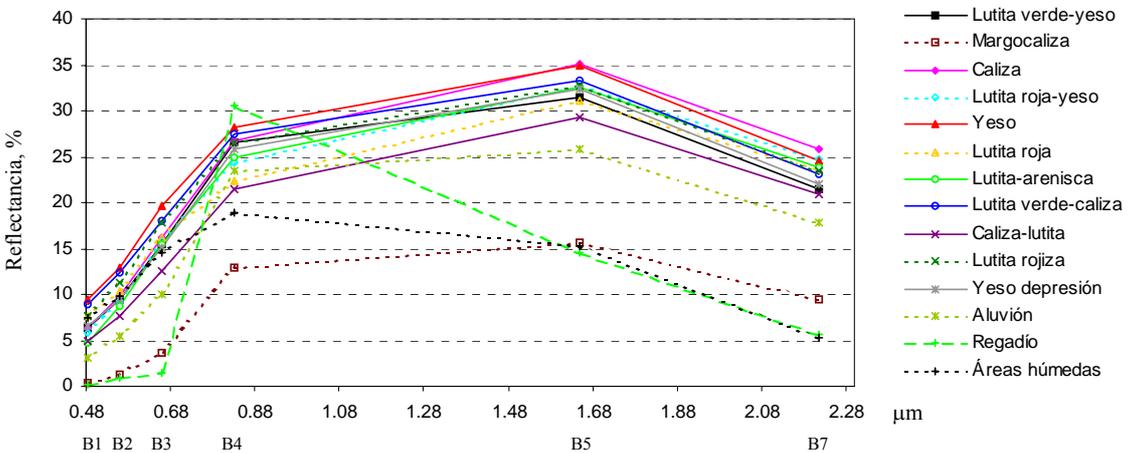
Exactitud de identificación (EI) y cartográfica (EC); Divergencia transformada (DT); Distancia de Jeffries Matusita (JM)



a) Imagen de marzo



b) Imagen de junio



c) Imagen de agosto

Figura III.29. Firmas espectrales de las clases temáticas generadas, Bujaraloz.

Algunas áreas dentro de las Unidades Litológicas lutita verde-caliza y lutita verde-yeso se clasificaron como yeso, en campo se constató la presencia de yeso en dichas áreas. Lo anterior significa que con la clasificación supervisada sí es útil para discriminar las áreas con yeso. Asimismo la variabilidad espacial de los afloramientos dentro de una misma litología dificulta su discriminación. Así lo indica el índice kappa, considerado como pobre para lutita verde-yeso y lutita verde-caliza, bueno para yeso y excelente para lutita-arenisca. Las primeras dos clases tienen más diversidad litológica que la última.

Con la disminución del número de clases se tiene más concordancia entre la clasificación supervisada y el mapa litológico, tanto en la imagen completa como en la máscara. Ello se debe a que al agrupar o eliminar litologías disminuye o desaparece el factor de confusión. Así, en la Figura III.29 se aprecia que el yeso presenta los valores de reflectancia más altos en las bandas ETM+ 1-4 y después está la caliza, la cual tiene reflectancias más altas a las del yeso en las bandas del IR medio (ETM+ 5 y 7), coincidiendo con lo reportado por Younis (1993) y con Mulders y Epema (1986). El yeso tiene valores más bajos a los de la lutita verde - caliza en la banda 7 y térmica y solamente el valor de temperatura es inferior a la clase lutita verde-yeso. En general los suelos con mineralogía gípsica presentan los valores espectrales más altos, lo cual coincide con lo reportado por Stoner y Baumgardner (1980; citados por Vries, 1991). Estas ligeras diferencias hacen que incremente la separabilidad del yeso en la máscara.

Pero, definitivamente, para poder hacer una mejor separación entre estas cuatro clases resultado de la combinación de tres tipos de rocas lutitas verdes, calizas y yeso, es necesaria una cartografía más detallada como verdad terreno de áreas muy similares a las del estudio de tal manera que sea de utilidad para las áreas de entrenamiento, aunque dada la complejidad o variabilidad de los afloramientos se requeriría una cartografía a escala lo suficientemente grande como para poder representar en el mapa unidades menores al cuarto de hectárea, lo cual demanda muchos recursos (tiempo, trabajo de campo y dinero). A falta de mapa litológico detallado se puede hacer un estudio interactivo imagen - trabajo de campo para definir las áreas de entrenamiento. La superficie por clase temática y número de clases incluidas en la clasificación supervisada se muestra en la Tabla III.16.

Otro aspecto importante y que influyó en la clasificación espectral es que en la cartografía de la litología prácticamente no se considera la capa superficial, y ésta es la parte del suelo de la cual obtienen información los sensores remotos, por lo que sería de mayor utilidad un mapa detallado de suelos para la selección de las áreas de entrenamiento.

Tabla III.16. Superficie, ha, por clase temática y clasificación supervisada de la imagen multitemporal (con las 21 bandas) y en la máscara, Bujaraloz.

Clase temática	Número de clases temáticas					
	14		12		8	
	ha	%	ha	%	ha	%
Lutita verde-caliza	9429.8	7.06	10633.7	7.94	10994.3	8.21
Margocaliza	7132.3	5.34	7162.7	5.35	7966.4	5.95
Caliza	12891.7	9.65	15272.9	11.41		
Lutita roja-yeso	6682.9	5.00	8295.9	6.20		
Yeso	13786.8	10.32	14836.2	11.08		
Lutita roja	4724.5	3.54	4759.8	3.56		
Lutita-arenisca	14895.4	11.15	16459.4	12.30		
Lutita verde-yeso	16062.7	12.03	17770.9	13.28	16359.0	12.22
Caliza-lutita	14124.0	10.58	15319.0	11.44		
Lutita rojiza	12247.1	9.17	13218.0	9.87		
Yeso depresión	4966.6	3.72				
Aluvión	8282.4	6.20				
Regadío	7543.1	5.65	9040.6	6.75	8804.4	6.58
Área húmeda	785.9	0.59	785.9	0.59	763.4	0.57
Lutita roja-II*					41323.8	30.87
Yeso-II**					16314.2	12.19
Caliza-II***					31029.4	23.18
Total	133555.2		133554.9	99.8	133554.9	99.8

**Superficie por clase temática en el área sin vegetación**

	Ocho clases		Seis clases	
	ha	%	ha	%
Área húmeda	402.3	2.9	409.2	2.9
Lutita verde-yeso	2157.3	15.5	3508.7	25.2
Lutita verde-caliza	2742.9	19.7	5055.6	36.4
Yeso	925.4	6.7	1853.4	13.3
Lutita rojiza	808.4	5.8	1623.4	11.7
Lutita roja	2619.6	18.8		
Lutita-arenisca	1433.5	10.3	1452.9	10.5
Caliza	2813.8	20.2		
Total	13903.3		13903.3	

\* Lutita rojiza + Lutita roja + Lutita-arenisca + Lutita roja-yeso

\*\* Yeso + Yeso depresión

\*\*\* Caliza + Caliza-lutita

### 6.3.3. Utilidad de la banda térmica.

Las unidades litológicas, en general tienen temperaturas ligeramente diferentes y se comportan en forma distinta en cada imagen (Figura III.30). Por ejemplo, la clase yeso en marzo tiene temperatura relativamente baja (23.8 °C) solamente mayor a las clases Margocaliza y caliza-lutita (21.6 y 22.6 °C, respectivamente); en junio su temperatura es la más alta (35.1 °C) después de las calizas (35.3 °C); sin embargo en agosto la clase yeso tiene temperatura igual a de la lutita verde-caliza (41.8 °C) y similar a la de las lutita verde-yeso, lutita roja y caliza (41.6, 41.0 y 41.6 °C, respectivamente).

Las temperaturas son más altas en la imagen de agosto debido a que este mes es el segundo más cálido (Figura III.3), es el más seco y se tiene la menor cobertura vegetal, contrastando con la imagen de marzo correspondiendo a finales del invierno, más húmeda y con mayor cobertura vegetal. En agosto la mayor parte de la vegetación está seca y por ello la imagen tiene bajo contraste espectral (Elvidge, 1988 y 1990). La vegetación verde origina un descenso generalizado en la temperatura debido al mayor contenido de agua en las hojas (Elvidge, 1988; Czajkowski *et al.*, 2001; Ritchie *et al.*, 2001), pudiendo ser de hasta de 18 °C con cubierta vegetal del 100 % en comparación a una cobertura del 40 % (Czajkowski *et al.*, 2001). Es importante conocer el estado de desarrollo de la vegetación y humedad del suelo en la fecha de las imágenes, ya que estos son los principales factores que inciden en la temperatura, con dicha información se estará en posibilidad de interpretar la banda térmica.

En términos generales, los resultados con la banda térmica son menos satisfactorios en Bujaraloz que en Cedral, debido a factores como topografía, pendiente, homogeneidad y extensión de las unidades litológicas o del suelo y vegetación. En Bujaraloz el relieve es más heterogéneo, es más ondulado y/o accidentado (Figura III.4), en cambio en Cedral el terreno rico en yeso es más llano con variaciones de pendiente muy bajas, longitud de la pendiente grande, y superficies relativamente homogéneas grandes (>> 1.0 ha), tal es el caso de áreas con yeso somero y pastizal gipsófilo, o con matorral desértico. Sobre el paisaje Younis (1993) dice que la topografía y la sombra modifican la respuesta espectral debido a las diferencias de iluminación.

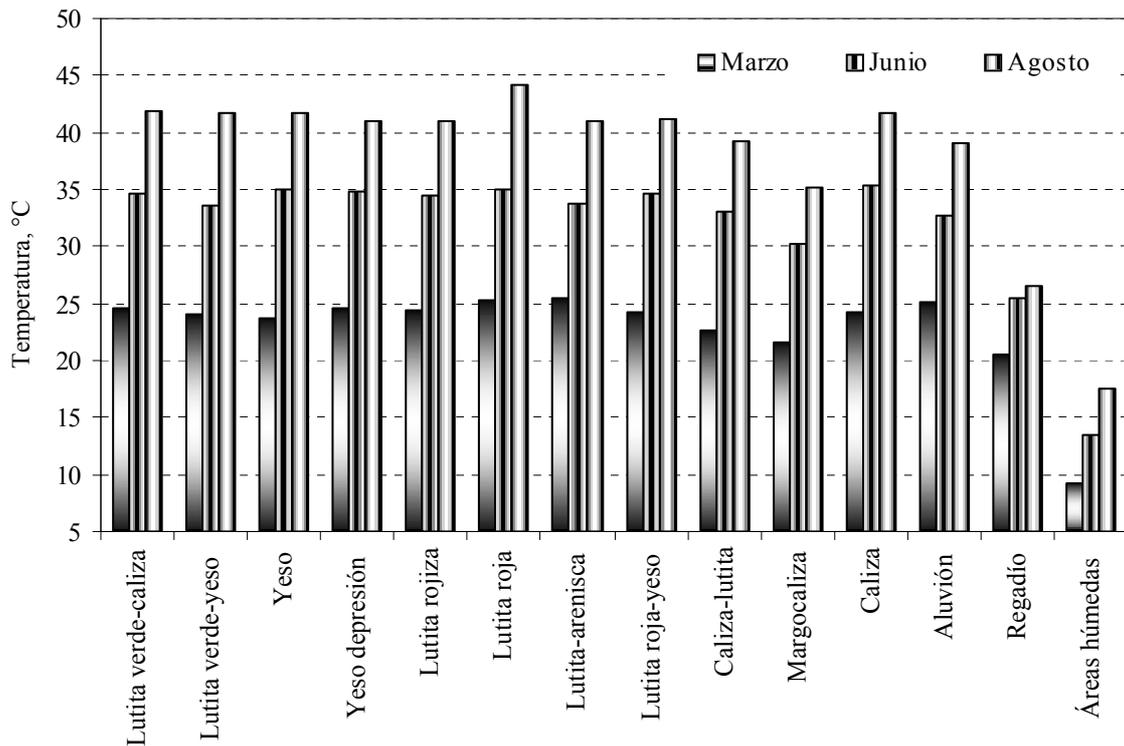


Figura III.30. Valores de temperatura por clase temática e imágenes completas, Bujaraloz.

En Bujaraloz las áreas yesosas con características a las de pastizal gipsófilo (B2) en Cedral por lo general son muy pequeñas a veces menores a 0.1 ha, de acuerdo a la resolución espacial del satélite (30 m en las bandas 1-5 y 7, y 60 para la banda térmica) no es posible su delimitación o caracterización espectral. Younis (1993) dice que se requieren mínimo 50 píxeles (4.5 ha) para tener una buena área de entrenamiento, y en su estudio realizado en una área yesosa de la región Almería-Murcia, España, utiliza un mínimo de 60 píxeles.

En Bujaraloz la heterogeneidad de los suelos y del horizonte superficial en específico, también se debe a la presencia de varios tipos de rocas en poco espacio, como se refleja en los nombres de las Unidades Litológicas en la cartografía escala 1:50 000 utilizada. Por lo que las clases temáticas pueden estar conformadas hasta por cuatro litologías.

Esta complejidad manifestada en el color del horizonte superficial del suelo y en la extensión de área relativamente uniformes muchas veces menores a media hectárea, afectando la temperatura y en general la reflectancia. Metternicht y Zinck (2003) dicen que un decremento de la saturación en dos unidades Munsell (de 10YR6/5 a 10YR6/3)

causa reducción de la reflectancia en todas las bandas. En Cedral se tiene horizonte yesoso a escasa profundidad en superficies grandes, hasta de decenas de hectáreas, con desarrollo de vegetación gipsófila, la fisonomía constante constituye un paisaje o unidad de terreno más homogénea, repercutiendo en la reflectancia y en las propiedades térmicas, facilitando su discriminación.

El tamaño y la homogeneidad de las superficies con pastizal gipsófilo de Cedral influyen positivamente en su discriminación. Esta “ventaja” del paisaje de Cedral frente al de Bujaraloz, se refleja en los resultados de la clasificación digital. Lo cual a su vez resalta la utilidad de las imágenes de satélite y de la banda térmica para discriminar terrenos o litologías de yeso.

Al analizar los valores de temperatura en superficie sin vegetación (Figura III.31) después de ser ésta eliminada con base al NDVI, se aprecia que el yeso, después de las áreas húmedas, es la clase con menor temperatura (40 °C) y la lutita roja tiene el valor más alto (43.3 °C). Las clases temáticas lutita verde-caliza, lutita verde-yeso y caliza tienen temperaturas muy similares (42.2, 42.3 y 42.5 °C, respectivamente) lo cual influye en la clasificación espectral y explica la confusión entre ellas.

Con la máscara se mejora un poco la separabilidad del yeso, en comparación con los resultados de la clasificación de la imagen de agosto, sin embargo se sigue confundiendo con las clases lutita verde-caliza, lutita verde-yeso y con caliza. Para incrementar la exactitud o separabilidad entre estas clases es necesario trabajo de campo y espectral más detallado.

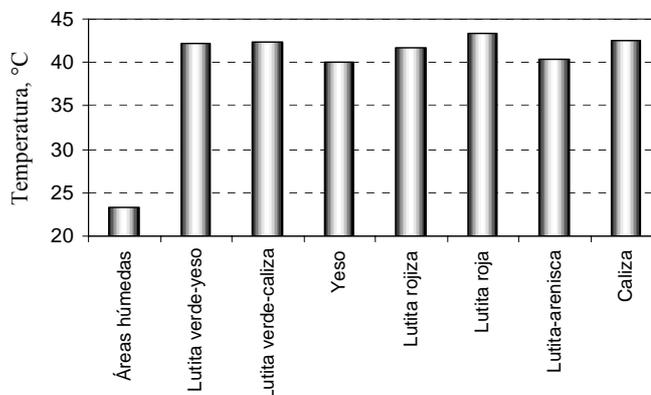


Figura III.31. Valores de temperatura superficial por clase temática obtenida en la máscara de la imagen de agosto, Bujaraloz.

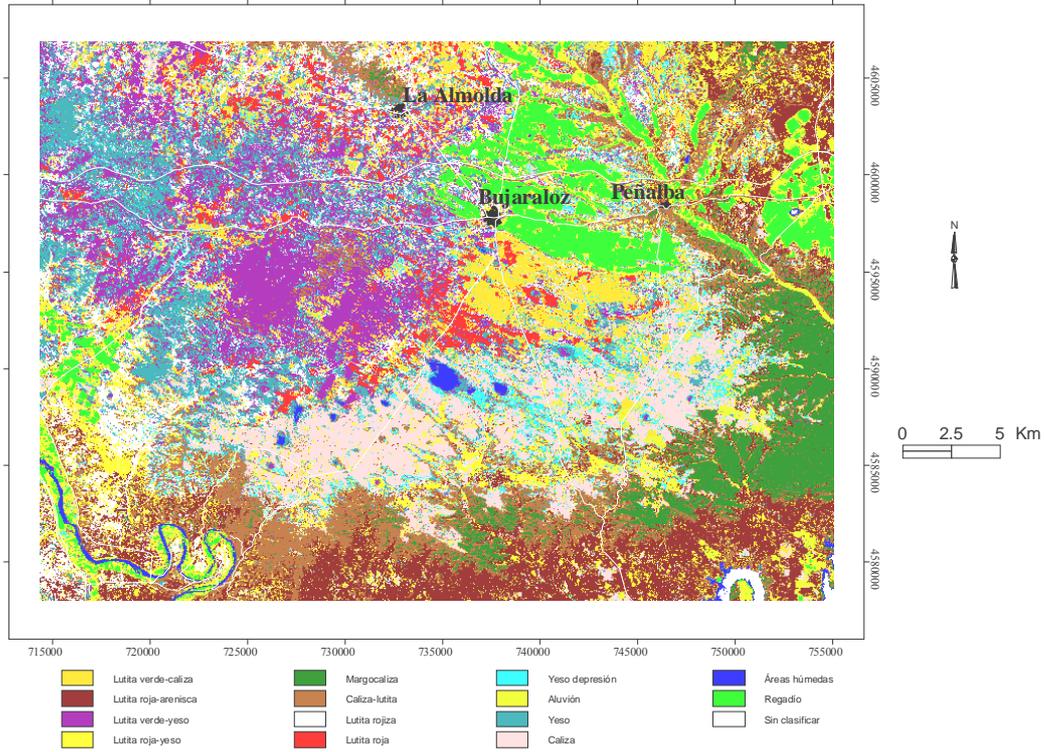
Para analizar la importancia de la temperatura en la discriminación de litologías, se realizó una clasificación espectral multitemporal sin las bandas térmicas (bandas 1-5, y 7 de las tres imágenes) y con las 14 clases (Tabla III.17). La fiabilidad global e índice kappa general disminuyeron solamente en un 0.02 (2 %). Sin embargo, en el análisis por clase se aprecian varios cambios, por ejemplo  $\kappa$  de las clases lutita roja y caliza-lutita bajó un 0.07, el de lutita verde-caliza disminuyó en 0.05, el de lutita rojiza se incrementó en un 0.05, las demás clases prácticamente se mantienen en sus valores, incluyendo el yeso.

La exactitud cartográfica que más bajó fue la de caliza-lutita (6.8 %), lutita roja en un 6.6 % y lutita verde-caliza en 5.2 %. Por otro lado la clase lutita verde-yeso incrementó un poco su discriminación, un 0.04 en  $\kappa$  y un 3.3 % en EI, sin embargo bajó un 4.9 % su EC. Es decir, la temperatura o banda térmica es útil en la discriminación de las Unidades Litológicas de Bujaraloz, tal como se apreció en la máscara (Figura III.31), aunque en menor medida que para Cedral. Sin embargo, para tener una conclusión definitiva sobre la utilidad de la banda del infrarrojo térmico transformada a temperatura, es necesaria más investigación en otras áreas, con las líneas generales seguidas en el presente trabajo y haciendo las modificaciones mencionadas en cada caso.

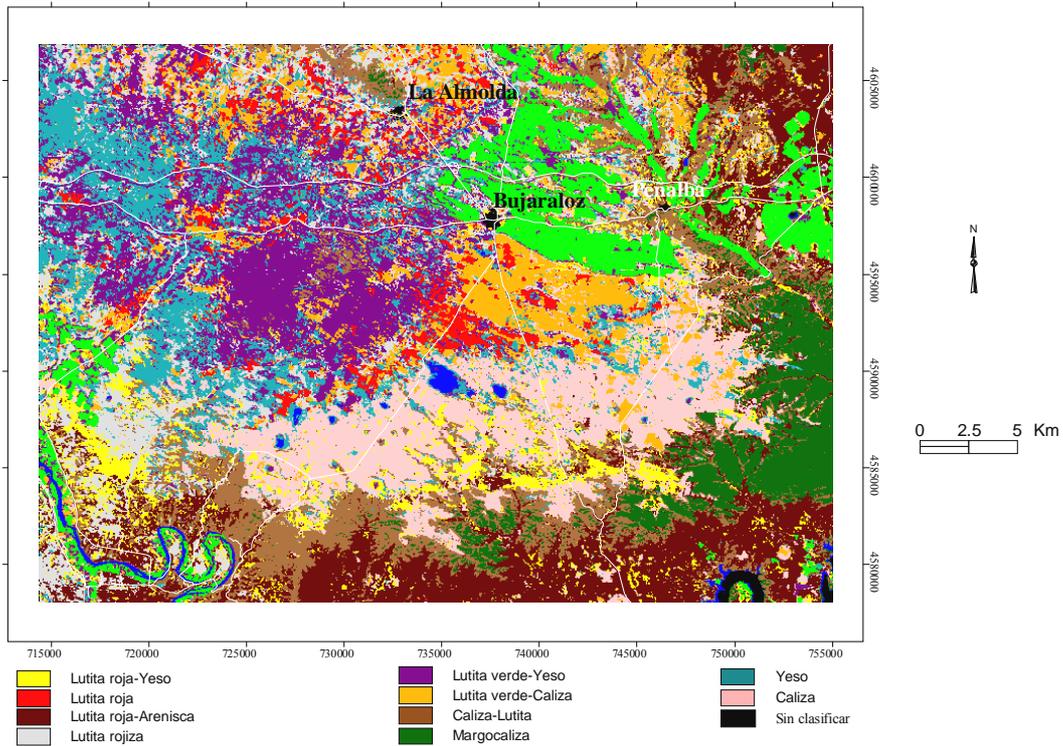
Tabla III.17. Resumen de la matriz de confusión de la clasificación supervisada multitemporal con y sin banda térmica, Bujaraloz.

Clase temática	Con banda térmica			Sin banda térmica		
	EI	EC	$\kappa$	EI	EC	$\kappa$
Lutita verde-caliza	51.8	55.8	0.45	46.6	44.1	0.40
Margocaliza	97.4	96.9	0.97	97.9	95.5	0.98
Caliza	50.7	78.8	0.47	49.5	73.0	0.46
Lutita roja-yeso	13.0	28.7	0.10	13.6	25.3	0.11
Yeso	21.1	30.0	0.16	22.8	36.7	0.18
Lutita roja	25.2	33.7	0.23	18.6	32.6	0.16
Lutita-arenisca	93.4	62.0	0.92	92.7	65.8	0.92
Lutita verde-yeso	85.1	51.7	0.80	88.4	46.8	0.84
Caliza-lutita	70.9	76.5	0.69	64.1	74.0	0.62
Lutita rojiza	45.9	46.4	0.41	50.2	54.1	0.46
Yeso depresión	18.3	40.4	0.17	18.2	51.7	0.17
Aluvión	34.3	44.9	0.33	23.3	40.1	0.22
Áreas húmedas	100.0	98.8	1.00	100.0	83.2	1.00
Regadío	100.0	97.5	1.00	99.8	96.4	1.00
Fiabilidad global, FG			0.60			0.58
Índice kappa general, $\kappa^*$			0.55			0.53

Exactitud de identificación (EI) y cartográfica (EC). Índice kappa general ( $\kappa^*$ ) y por clase ( $\kappa$ ).



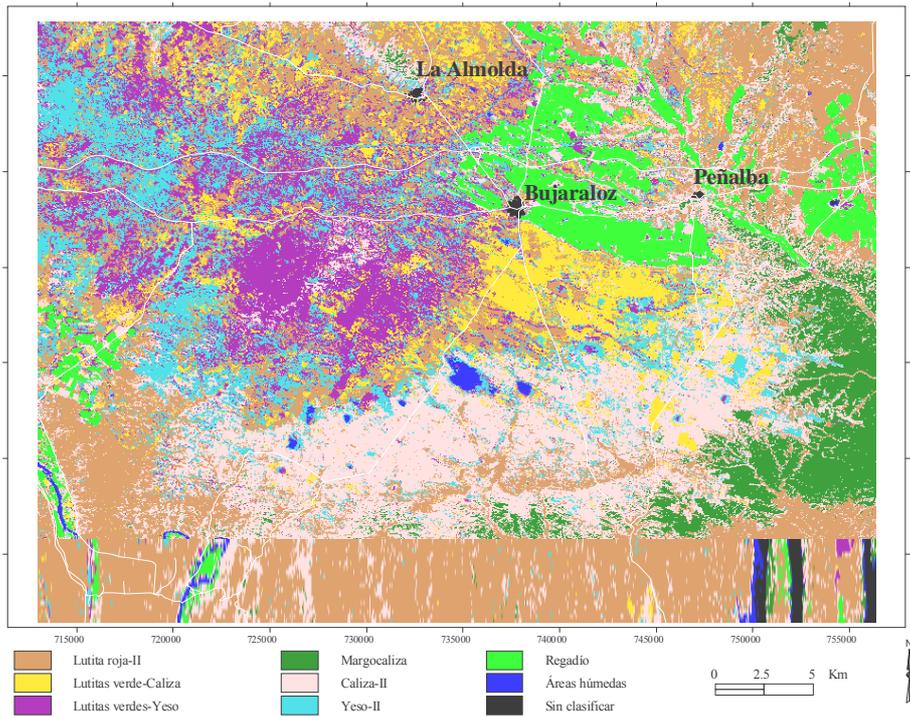
a) Clasificación con catorce clases, imagen multitemporal, Bujaraloz, España.



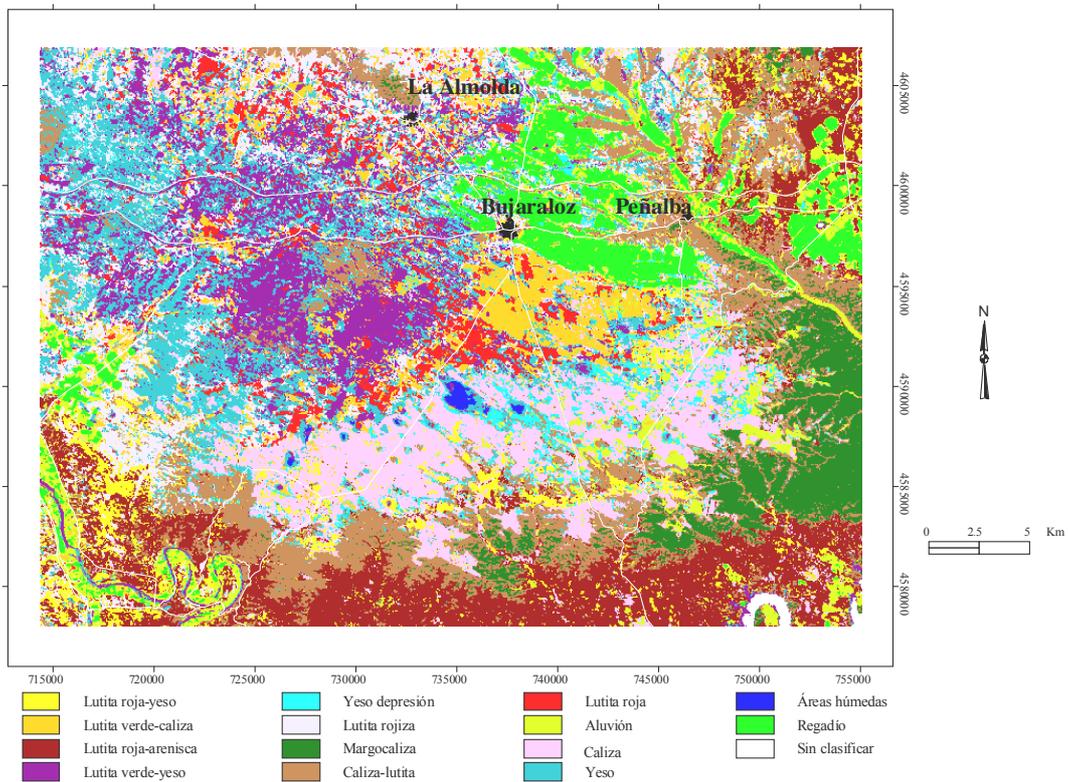
b) Clasificación con doce clases, imagen multitemporal, Bujaraloz, España.

Figura III.32. Clasificación supervisada de la imagen multitemporal con 14 y 12 clases.

Suavizadas con filtro 3x3 y estadístico moda, Bujaraloz.

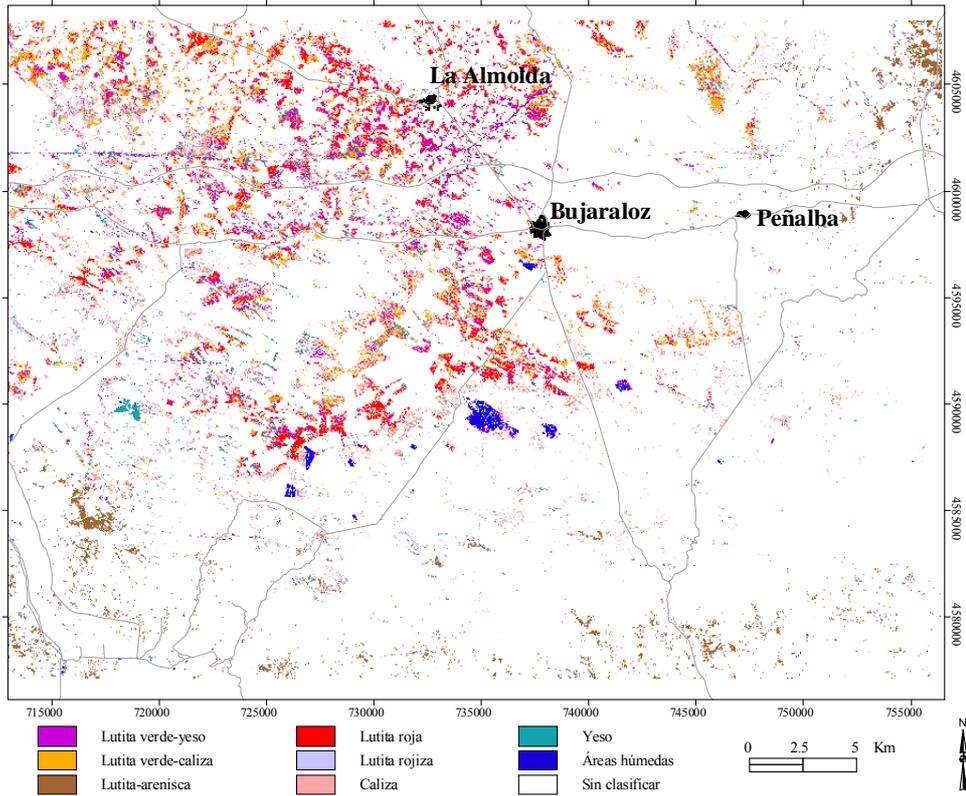


a) Clasificación con ocho clases, imagen multitemporal, Bujaraloz, España.

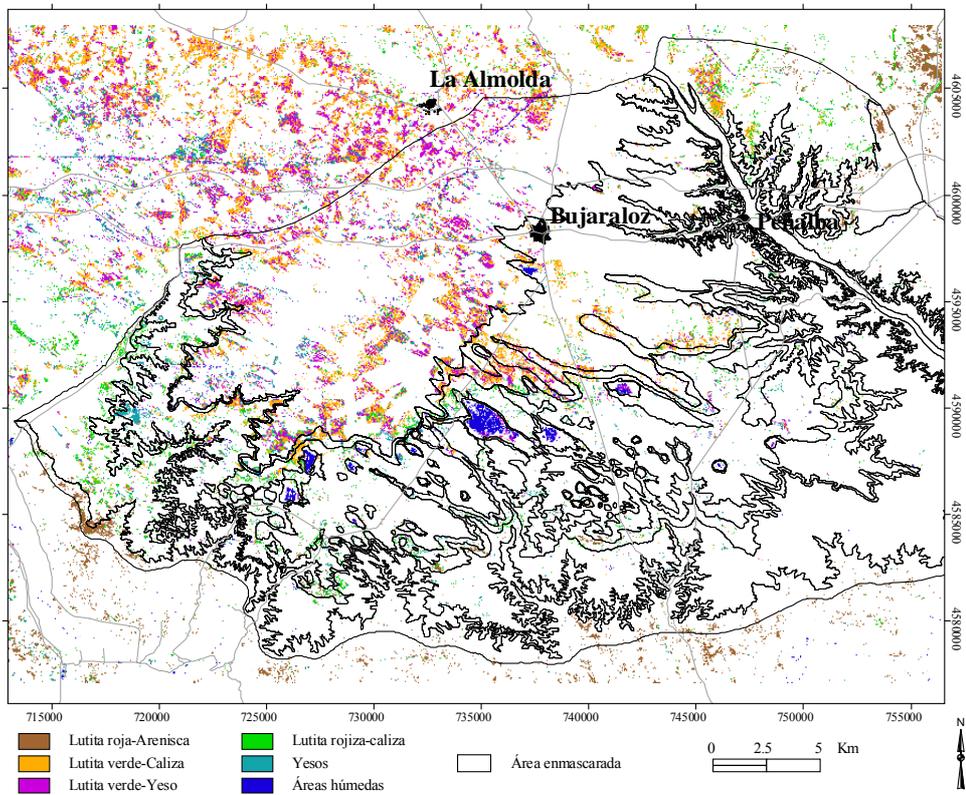


b) Clasificación con catorce clases, sin las bandas térmicas, Bujaraloz, España.

Figura III.33. Clasificación supervisada de la imagen multitemporal sin las bandas térmicas con 8 y 14 clases. Suavizadas con filtro 3x3 y estadístico moda, Bujaraloz.



a) Clasificación con ocho clases, máscara, imagen de agosto, Bujaraloz.



b) Clasificación con seis clases, máscara, imagen de agosto, Bujaraloz.

Figura III.34. Clasificación supervisada en la máscara de la imagen de agosto con 6 y 8 clases. Suavizadas con filtro 3x3 y estadístico moda, Bujaraloz.

## 7. CONCLUSIONES

El análisis visual de las imágenes de Bujaraloz, tanto en valores de reflectancia como con transformaciones (Análisis de Componentes Principales tradicional y en grupos de bandas, Tasseled Cap, IHS), no permitió una buena discriminación de los yesos, y únicamente se logró distinguir grupos de litologías similares. El yeso se confunde, en su parte más accidentada y con vegetación (de la Val Cenicera hacia el norte, La Retuerta), con las litologías de Lutitas verdes-yeso-caliza y Lutitas verde-caliza--yeso y en la parte más plana (desde la Val Cenicera en dirección O-E) con las Calizas.

El índice de yeso superficial no permitió discriminar en forma clara las áreas con yeso somero, en Cedral, o con litología yesosa en Bujaraloz. Solamente se tuvieron ligeras diferencias entre las áreas con yeso y las calizas y las lutitas. Para estar seguros de la utilidad del índice de yeso es necesario realizar más investigación incluyendo información de la composición del suelo, humedad, textura, entre otros datos, o generar otro índice.

En Cedral, el orden de importancia de las bandas por su utilidad en la discriminación de los terrenos yesosos fue ETM+ 6, 5, 7, 4, 3, 1, y 2; y las mejores combinaciones RGB para el análisis visual fueron 675, 647 y 157. Para Bujaraloz el orden de importancia de las bandas fue  $7 \approx 5$ ,  $6, 4, 2 \approx 1$  y 3, y las mejores combinaciones RGB  $741 \approx 541$ ,  $742 \approx 542$ ,  $753 \approx 751$ . En Cedral, las áreas de yeso se aprecian de color cian con las combinaciones RGB 753, 752 ó 751 y en Bujaraloz también en cian con las combinaciones RGB  $741 \approx 541$ ,  $742 \approx 542$  y 756.

La banda del infrarrojo térmico, por su sensibilidad al contenido de agua de las plantas, resultó clave para delimitar coberturas asociadas a suelos con yeso somero, e importante para discriminar yeso de otras litologías, siendo de más utilidad en Cedral que en Bujaraloz.

En Cedral se ha delimitado el pastizal gipsófilo a partir de datos de satélite ( $FG = 0.88$  y  $0.85$ ;  $\kappa$  general =  $0.85$  y  $0.82$ , y  $\kappa$  pastizal gipsófilo =  $0.94$  y  $0.84$  en la época seca y húmeda, respectivamente), dicha formación vegetal se implanta en suelos con horizonte yesoso a profundidad menor a 10 cm. En términos generales y cuando se estudia solamente el área yesosa, en Cedral, la imagen de la época húmeda discriminó mejor las clases de ocupación relacionadas con yeso somero. Cuando se incluyen áreas sin yeso, esta imagen sobreestima la superficie del pastizal gipsófilo, es decir se genera

una cartografía más exacta con la imagen de la época seca. Esto se confirmó en Bujaraloz, en donde se tuvieron mejores resultados con la imagen de agosto. Se recomienda la imagen del mes más seco para estudios de suelos o litologías mediante imágenes satelitales.

Para Bujaraloz, la clasificación espectral con mayor exactitud se generó con la imagen multitemporal incluyendo a las tres fechas de imágenes (marzo, junio y agosto). Estos resultados fueron aún mejores cuando se agruparon clases litológicas de acuerdo a la geología dominante de la unidad cartográfica ( $FG = 0.60$  y  $0.67$ ,  $\kappa$  general =  $0.55$  y  $0.60$ ,  $\kappa$  yeso =  $0.16$  y  $0.18$ , con 14 y 8 clases, respectivamente).

En las imágenes de Bujaraloz, los terrenos yesosos presentaron los valores más altos de reflectancia en las bandas ETM+1 a 4 y los valores de ETM+5 y 7 solamente son menores a los de las calizas. Así mismo, el yeso presentó el índice de brillo (de la transformación Tasseled cap) más alto, así como la mayor luminosidad o “*value*”, siguiéndole la Unidad Litológica Lutitas verdes-Yesos-Calizas (clase temática lutita verde-yeso).

Los mapas litológicos son útiles como datos de referencia para la discriminación espectral de suelos yesosos; sin embargo, no son suficientes como única fuente de información del terreno a estudiar. Ello se debe a que las unidades cartográficas se establecen por lo general sin considerar la capa superficial, cuya información es la registrada por el satélite, originando confusiones en la clasificación supervisada, superables sólo con más información de campo y/o laboratorio. Es decir, un mapa de suelos sería de mayor utilidad como verdad terreno y se generarían clasificaciones espectrales con mayor exactitud.

El procedimiento presentado (*clasificación espectral uni y multitemporal de imágenes Landsat ETM+; asignación por máxima verosimilitud; transformación de la banda del infrarrojo térmico a temperatura superficial; utilización de información cartográfica sobre el suelo, vegetación, uso del suelo y litología como datos de referencia; y verificación de campo*) consigue discriminar coberturas relacionadas con terrenos yesosos en el caso de Cedral, y localizar litología de yeso en Bujaraloz. Las dos áreas son diferentes lo cual refuerza la validez del método y la utilidad de las imágenes Landsat para delimitar terrenos yesosos.

## 8. LITERATURA CITADA

- Abd El-Hady, A. M. 1992. Discrimination of gypsiferous, calcareous and sandy soil surfaces using the principal componentes (PC) transformation of Thematic Mapper. *Egyptian Journal of Soil Science* 32(1): 71-80.
- Allen, R. C., Peter, R. J., Moore, J. McM., y Liu, J. G. 1996. Classification based image enhancement for mineral mapping and mine site study. In: Proc. 11<sup>th</sup> International Thematic Conference on Geoscience Remote Sensing, 27-29 February 1996, Las Vegas, Nevada, USA. (ERIM, Ann Arbor, Michigan). Vol. 1: 177-186.
- Barnes, E. M., Sudduth, A.K., Hummel, H. W., Lesch, S. M., Corwin, L D., Yang, Ch., Daughtry, S. T. C., y Bausch, C W. 2003. Remote- and ground-based sensor techniques to map soil properties. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 69(6): 619 – 630.
- Bryant, R. G. 1996. Validated linear mixture modelling of Landsat TM data for mapping evaporite minerals on a playa surface: methods and applications. *International Journal of Remote Sensing* 17(2): 315 – 330.
- Castañeda, C. 2002. El agua de las saladas de Monegros sur estudiada con datos de campo y de satélite. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, España. 158 pp.
- CETENAL, 1972. Cartas de uso del suelo y edafológicas F14 A25, F14 A24, F14 A23 y F14 A14, escala 1:50 000. SPP, México.
- CNA, 2000. Datos de clima proporcionados en formato electrónico. Comisión Nacional del Agua, Gerencia Estatal de San Luis Potosí. México.
- CRM, 1992. Monografía geológico-minera del estado de San Luis Potosí. Publicación M-7e. Consejo de Recursos Minerales; Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Subsecretaría de Minas e Industria Básica.
- CRM, 1996. Carta geológico-minera Matehuala F14-1, escala 1:250 000. Consejo de Recursos Minerales, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, México.
- Crowley, J. K. 1991. Visible and near-infrared (0.4-2.5  $\mu\text{m}$ ) reflectance spectra of playa evaporite minerals. *Journal of Geographical Research* 96(B10): 16231-16240.
- Crowley, J. K. 1993. Mapping playa evaporite minerals with AVIRIS data: A first report from Death Valley, California. *Remote Sensing of Environment* 44: 337-356.

- Czajkowski, K. P., Coss, J., Mulhern, T., y Lakshmi, V. 2001. Field experiment design for land surface temperature validation. P: 231-233. In: *Remote Sensing and Hydrology 2000* (Proceedings of a symposium held at Santa Fe, New Mexico, USA, April 2000). IAHS Publ. No 267.
- Chavez, P.S. Jr. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment* 24: 459-479.
- Chuvieco, S.A. 2002. Teledetección ambiental, la observación de la tierra desde el espacio. Editorial Ariel Ciencia, Barcelona. 586 pp.
- Drake, N. A. 1995. Reflectance spectra of evaporite minerals (400-2500 nm): applications for remote sensing. *International Journal of Remote Sensing* 16(14): 2555-2571.
- Drake, N. A., Mackin, S. y Settle, J. J. 1999. Mapping vegetation, soils, and geology in semiarid shrublands using spectral matching and mixture modeling of SWIR AVIRIS imagery. *Remote Sensing of Environment* 68: 12-25.
- Eastes, J. W. 1989. Spectral properties of halite-rich mineral mixtures: Implications for middle infrared remote sensing of highly saline environments. *Remote Sensing of Environment* 27: 289-304.
- Elvidge, D.C. 1988. Thermal infrared reflectance of dry plant materials: 2.5-20.0  $\mu\text{m}$ . *Remote Sensing of Environment* 26: 265-285.
- Elvidge, C.D. 1990. Visible and infrared reflectance characteristics of plant materials. *International Journal of Remote Sensing* 12: 1775-1795.
- Escadafal, R. y Bacha, S. 1996. Strategy for the dynamic study of desertification. *Proceedings of the ISSS International Symposium*, Ouagadougou, Burkina Faso. 6-10 February 1995 Paris, ORSTON editions. P: 19 – 34.
- FAO, 1990. Management of gypsiferous soils. *FAO Soils Bulletin* 62. Rome. 81 pp.
- FAO/UNESCO, 1968. Clave de unidades de suelos para el mapa de suelos del mundo. Roma, Italia.
- Ferrero, S. B., Palacio, M. G., y Campanella, O. R. 2002. Análisis de componentes principales en teledetección. Consideraciones estadísticas para optimizar su interpretación. *Revista de Teledetección* 17: 43 – 54.
- Fitzgerald, R. W., y Lees, B. G. 1994. Assessing the classification accuracy of multisource remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 47(3): 362 – 368.

- García, E. 1988. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). UNAM, México. D. F. 178 pp.
- García, R. M. P., y Pérez, G. M. E. 2001. Discriminación de gypsisoles mediante el sensor ETM+ del satélite Landsat 7. *Edafología* 8(3): 25 – 36.
- García-Calderón, J. 1968. Carta geológica de México, serie de 1:100000. Hoja El Salado 14R-j(11). Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.
- García-Calderón, J. 1978. Carta geológica de México serie de 1:100000. Hoja Santa Rosa 14R-j(12). Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.
- García-Meléndez, E., Suárez, M., Rianza, A., Ferrer-Juliá, M., Goy, J. L. y Zazo, C. 2001. Respuesta espectral (visible e infrarrojo, 400 – 2500 nm) en imágenes TM y en espectros de laboratorio de unidades morfosedimentarias cuaternarias del entorno de Albos (Almería) en función de su contenido de carbonatos. P: 302 – 303. En: Rosell U. J. I., y Martínez-Casasnovas J. A. *Teledetección, Medioambiente y Cambio global*, Universidad de Lleida, España.
- Goossens, R., y Van Ranst, E. 1998. The use of remote sensing to map gypsiferous soils in the Ismalia Province (Egypt). *Geoderma* 87: 47-56.
- Goossens, R., Van Ranst, E., Ghabour, T.K. y El Badawi, M. 1999. The use of remote sensing and GIS to detect gypsiferous soils in the Ismalia Province, Egypt. p: 97-102. En: *Nieuwenhuis, G. et al. (eds) Operational remote sensing for sustainable development Proc. 18<sup>th</sup> EARSeL Symposium, May 1998*. Balkema, Rotterdam.
- Guerrero-Campo, J., Alberto, F., Hodgson, J., García-Ruiz, J. M., y Montserrat-Martí, G. 1999. Plant community patterns in a gypsum area of NE Spain. I. Interactions with topographic factors and soil erosion. *Journal of Arid Environments* 41: 401-410.
- Hunt, G.R., Salisbury, J.W. y Lenhoff, C.J. 1971. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: IV. Sulphides and sulphates. *Modern Geology* 3: 1-14.
- Hunt, G. R. 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geographics*, 42(3): 501 – 513.
- IGN, Instituto Geográfico Nacional. 2002. Mapa topográfico nacional de España, Hojas 413 y 414 escala 1:25 000. Centro Nacional de Información Geográfica, Madrid, España.

- INEGI, 1983. Carta estatal, SLP, de suelos, de vegetación y uso actual, y de regionalización fisiográfica escala 1:1000 000. SPP, México.
- Koch, M. 2000. Geological controls of land degradation as detected by remote sensing: a case study in Los Monegros, north-este Spain. *International Journal of Remote Sensing* 21(3): 457-473.
- Landis, J. R. y Koch, G. G. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 33: 159 – 174.
- Lillesand, T. M., y Kiefer, R. W. 1996. Remote sensing and image interpretation. Third edition, John Wiley & Sons, Inc, New York. 720pp.
- Lindberg, J. D., y Smith, M. S. 1973. Reflectance spectra of gypsum sand from the White sands National Monument and basalt from a nearby lava flow. *American Mineralogist* 58: 1062-1064.
- Machín, J., y Navas, A. 1998. spatial análisis of gypsiferous soils in the Zaragoza province (Spain), using GIS as an aid to conservation. *Geoderma* 87: 57-66.
- Martínez-Cob, A., Faci, G. J. M. y Bercero, B. A. 1998. Evapotranspiración y necesidades de riego de los principales cultivos en las comarcas de Aragón. Institución Fernando el Católico, Zaragoza, España. 223 pp
- Martínez-Ríos, J. J., y Monger, H. C. 2002. Soil classification in arid lands with Thematic Mapper data. *Terra* 20: 89-100.
- Mashali, A. M. 1996. Soil management practices for gypsiferous soils. P 34-52 , In: *Proceedings of the Interantional Symposium on Soils with Gypsum*, 15-21 september, Lleida, Spain. Editor Poch R. M.
- Matthias, A. D., Fimbres, A., Sano, E. E., Post, D. F., Accioly, L., Batchily, A. K., y Ferreira, L. G. 2000. Surface roughness effects on soil albedo. *Soil Science Society of America Journal* 64: 1025 - 1041.
- Metternicht, G. I., y Zinck, J. A. 2003. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. *Remote Sensing of Environment* 85: 1 - 20.
- Meyer, E.S., García-Moya, E. y Lagunes-Espinoza, L. C. 1992. Topographic and soil surface effects on gypsophile plant community patterns in central México. *Journal of Vegetation Science* 3: 429-438.
- Mougenot, B. 1990. Caracteristiques spectrales de surfaces salées à chlorures et sulfates Sénégál. *2ème Journées télédetection, Caractérisation et suivi des milieux terrestres en régions arides et tropicales*, Déc. 1990. Bondy, France, Colloques et Séminaires, éd. ORSTOM, Paris, France, 49-70.

- Mougenot, B., Pouget, M., y Epema, G. F. 1993. Remote sensing of salt affected soils. *Remote Sensing Reviews* 7: 241 – 259.
- Mulders, M. A., y Epema, G. F. 1986. The thematic mapper: a new tool for soil mapping in arid areas. *ITC Journal* 1: 24 – 29.
- Mulders, M. A., y Girard, M. C. 1993. Remote sensing of soils in warm arid and semi-arid lands. *Remote Sensing Reviews* 7: 341 – 363.
- Munsell Color Company, 1988. Munsell soil color charts. Macbeth Division of Kollmorgen Instruments Corporation, Baltimore, Maryland, USA.
- Navas, A. 1983. Las litofacies de la cuenca del Ebro. Síntesis cartográfica y consideraciones sobre su papel en la planificación territorial. Tesis de Master of Sciences. IAMZ-CIHEAM. Zaragoza, 239 pp.
- Neville, P., Coward, R.I., Watson R.P., Inglis, M., y Morain, S. 2000. The application of TM imagery and GIS data in the assessment of arid land water and land resources in West Texa. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 66(11): 1373 – 1379.
- Panah, S. K. A., y Goossens, R. 2000. Contribution of soil salinity to the surface reflectance recorded by landsat MSS and TM sensors. p: 393-403. In Goossens R. and De Vliegheer B. M (Editors) *1<sup>st</sup> Workshop of the EARSeL Special Interest Group on Remote Sensing for Developing Countries, 13-15 September*, Gent, Belgium.
- Pinilla, C. R. 1995. Elementos de teledetección. Editorial RA-MA. Madrid. 213 pp.
- Post, D. F., Fimbres, A., Matthias, A. D., Sano, E. E., Accioly, L., Batchily, A. K., y Ferreira, L. G. 2000. Predicting soil albedo from soil color and spectral reflectance data. *Soil Science Society of America Journal* 64: 1027 - 1034.
- Ramírez, M. J. I. 1997. Mapa Geológico de España, Hoja Gelsa 413 (29-16) escala 1:50 000. Instituto Tecnológico GeoMinero de España, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Ritchie, J. C., Schmugge, T. J., Rango, A., y Schiebe, F. R. 2000. Monitoring physical and biological properties at the Sevilleta LTER using remote sensing. P: 234-236. In: *Remote Sensing and Hydrology 2000* (Proceedings of a symposium held at Santa Fe, New Mexico, USA, April 2000). IAHS Publ. No 267.
- Salvany, J. M., García, V. M. A., y Samper, J. 1996. Geología e hidrogeología de la zona endorreica de Bujaraloz-Sástago (Los Monegros, provincias de Zaragoza y Huesca). *Acta Geológica Hispánica* 30(4): 31 – 50. (pub. 1996).

- Schmidt, H. y Karnieli, A. 2001. Sensitivity of vegetation indices to substrate brightness in hyper-arid environments: the Makhtesh Ramon Crater (Israel) case study. *International Journal of Remote Sensing* 22(17): 3503 – 3520.
- Schmugge, T., French, A., Ritchie, J.C., Rango, A. y Pelgrum, H. 2002. Temperature and emissivity separation from multispectral thermal infrared observations. *Remote Sensing of Environment* 79: 189 – 198.
- SEMARNAP, 1999. Mapa de suelos dominantes en México, Primera aproximación. SEMARNAP-CP-INEGI, México.
- Servicio Geográfico del Ejército, 1983. Carta topográfica escala 1:50 000 Hoja 414 (30-16). Cartografía Militar de España, España.
- Servicio Geográfico del Ejército, 1985. Carta topográfica escala 1:50 000 Hoja 413 (29-16). Cartografía Militar de España, España.
- SMN, 1976. Normales climatológicas periodo 1941-1970. Servicio Meteorológico Nacional. Dirección General de Geografía y Meteorología, SAG. México.
- Sobrino, J. A. (Ed). 2000. Teledetección. Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia, España. 467 pp.
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., y Paolini, L. 2004. Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5. *Remote Sensing of Environment* 90: 434 – 440.
- Soil Survey Staff, 1999. Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd ed. USDA Agriculture Handbook. 436. Washington, DC.
- Solà, S. J., y Costa, M. J. M. 1997. Mapa Geológico de España, Hoja Bujaraloz 414 (30-16) escala 1:50 000. Instituto Tecnológico GeoMinero de España, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Sospedra, F., Caselles, V., y Valor, E. 1998. Effective wavenumber for thermal infrared bands-application to Landsat-TM. *International Journal of Remote Sensing* 19(11): 2105-2117.
- Valor, E., y Caselles, V. 1996. Mapping land surface emissivity from NDVI: Application to European, African and South American areas. *Remote Sensing Environment* 57: 167 – 184.
- Van de Griend, A. A., y Owe, M. 1993. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index surfaces. *International Journal of Remote Sensing* 14(6): 1119-1131.

- Van den Bergh, P. J., y Bouman, B. A. M. 1986. Theoric reflection modelling of soil surface properties. *Symposium on Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management*. Enschede. P: 331 – 334.
- Vries De, A. 1991. Intrinsic reflection characteristics of gypsum and calcite (high spectral resolution laboratory measurements). Agricultural University, Wageningen. 41 pp. Review.
- White, K., y Drake, N. A. 1993. Mapping the distribution and abundance of gypsum in South-Central Tunisia from Landsat Thematic Mapper data. *Z. Geomorph. N. F.* 37(3): 309-325.
- Younis, M. T. 1993. Caracterización y discriminación espectral mediante radiometría de campo e imágenes Landsat-5 TM, de unidades litológicas en el área de Alcantarilla, Murcia. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad de Zaragoza, España. pp. 276.
- Younis, M. T., Gilabert, M. A., Meliá, J., y Bastida, J. 1997. Weathering process effects on spectral reflectance of rocks in a semi-arid environment. *International Journal of Remote Sensing* 18(16): 3361 – 3377.
- Zhang, Y., Guindon, B., y Cihlar, J. 2002. An image transform to characterize and compensate for spatial variations in thin cloud contamination of Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 82: 173 - 187.

**ANEXO III.1.** Resultados de la verificación en campo de la clasificación espectral, Bujaraloz, España.

Sitio	Nombre	Latitud Norte, UTM	Longitud Oeste, UTM	Litología		Datos de campo				
						Color		Condición del suelo	Geología	Ocupación
				Salvany	Imagen	Seco	Húmedo			
1.1	Salineta	4596302	737739	Lv_Cz_Y	Lv_Y_Cz	10YR8/1	10YR6.5/2	Sello	Lutitas, caliza	Barbecho
1.2	Salineta	4596195	737682	Lv_Cz_Y	Lr_Cz, Yeso-8clases	10YR6/1	10YR5/1	Sin sello	Lutitas, caliza	Barbecho
1.3	Costra	4596207	737641	Lv_Cz_Y	Lv_Y_Cz	10YR8/1	10YR6.5/2	Costra dura	Lutitas, caliza	Cebada
2	Paridera Casasnovas	4592482	744652	Lr_Ar_Cz	Yeso	10YR6/2	10YR5/2	Sello	Yeso, loma	Cebada
3.1	Hoya de Farga	4592506	743844	Caliza	Yeso	10YR6/2	10YR5/2	Sello, salino	Yeso nodular	<i>Suaeda, Atriplex</i>
3.2		4592540	743935	Caliza	Yeso	10YR8/2	10YR7/2-3	Costra	Yeso farinoso < ¼ ha	
3.3		4592473	743775	Caliza	Yeso	10YR8/2	10YR7/2-3	Costra	Yeso farinoso < ¼ ha	
4.0	Corral de Martín	4593161	744389	Lv_Y_Cz	Yeso	10Y7/2	10YR6/3	Sello	Caliza	Cebada
5.1	Costra	4589964	743534	Yeso	YD, Cz (12, 8c)	10YR7/2	10YR5/2.5	Costra	Caliza sobre yeso nodular	Barbecho
5.2	Costra Suelo	4589925	743303	Yeso	Yeso	10YR7/2	10YR5/3	Costra	Yeso polvoso, salino	Alfalfa
5.3		4589925	743303	Yeso	Yeso	10YR6/2	10YR5/3			
5.3	Costra Suelo	4589957	743349	Yeso	Yeso	10YR8/2	10YR8/2	Costra	Caliza, yeso nodular	Barbecho
5.3		4589957	743349	Yeso	Yeso	0YR7/3	10YR5/3			
6.0	Costra y suelo de color muy similar	4589097	748678	Caliza	Yeso, 12 y 8 clases	10YR8/1	10YR7/2-1	Costra	Yeso nodular y farinoso	Labrado
8.0	Hoya de las Berzas	4588781	731620	Cz, Lr_Ar_Cz	Yeso	10YR8/1	10YR6/3	Sello, salino CE 0.12 dS/m, ondulado	Caliza, yeso nodular	Cebada

Continuación del anexo III.1

Sitio	Nombre	Latitud Norte, UTM	Longitud Oeste, UTM	Litología		Datos de campo				
						Color		Condición del suelo	Geología	Ocupación
				Salvany	Imagen	Seco	Húmedo			
9.0	Val de Francín, "Tapiz algal"	4587948	733460	Yeso	Yeso	10YR8/1	10YR7/1	Tapiz algal CE= 7.2 dS/m, sin reacción al HCl, el suelo con reacción moderada	Yeso, yeso nodular en bordes del barranco,	Depresión, agrícola en descanso
9.0	Limo, bajo el tapiz	4587948	733460		Yeso	10YR7/1	10YR6/2	CE= 5.4-8.5 dS/m	caliza, lutitas	
10.0	Barranco de Val de Francín	4588518	732978	Yeso	Cz_Lv_Lr, Cz con 8c	10YR6/2	10YR4/2	Pedregoso	Caliza 90 %, yeso 10 %	Cebada
11.1	Val de Polonia	4588036	725466	Lv_Y_Cz	Yeso	10YR8/2	10YR6/3	Sin sello	Yeso nodular, loma	Cebada
11.2	Suelo Costra	4586963 4586963	724546 724546	Lv_Y_Cz Lv_Y_Cz	Yeso Yeso	10YR6/2 10YR7/2	10YR4.5/3 10YR5.5/2	Costra	Caliza	Cebada
14.0	Suelo Lutita	4590361 4590361	729252 729252	Lv_Y_Cz	Yeso	10YR7/1 10YR8/1	10YR6.5/1 10YR7/1	Costra	Yeso nodular, Lutita, loma,	Cebada
15.1	Camino de Val Falcones. Costra	4595351	729758	Lv_Y_Cz	Cz_Lv_Lr, Cz con 8c	10YR8/1	10YR7/2	Costra blanda	Yeso nodular y espejuelo	Pino, sabina, romero, líquenes
15.2	Costra, suelo con color similar	4595351	729758	Lv_Y_Cz	Lv_Y_Cz	10YR8/1_2	10YR8/3 - 7/3	Costra dura	Yeso nodular y espejuelo	Pino, sabina, romero Líquenes variados
15.2	Liquen color limo	4595351	729758	Lv_Y_Cz	Lv_Y_Cz	10YR7/1	10YR6/1-2			
17.1	Saso de La Sarda	4592064	739807	Caliza	Caliza	10YR5/2	10YR3/2	Sin sello	Caliza y lutita Desnivel de cm	Barbecho
17.2		4592064	739807	Caliza	Caliza	10YR6/3	10YR4.5/3			
18.0	Cantera de yeso. Costra	4589450	719149	Yeso	Yeso	10YR7-6/1	10YR6/2	Costra dura	Yeso	Herbáceas
18.0	Suelo	4589450	719149	Yeso	Yeso	10YR7/2	10YR7/2			
18.0	Costra, área agrícola	4589450	719149	Yeso	Yeso	10YR8/2	10YR8/2			
19.0	Entre mina de yeso y Val Cenicera	4588510	719732	Yeso	Caliza	10YR6/1	10YR5/3	Costra blanda	Caliza, yeso nodular (< 10 %)	Barbecho

Continuación del anexo III.1

Sitio	Nombre	Latitud Norte, UTM	Longitud Oeste, UTM	Litología		Datos de campo				
						Color		Condición del suelo	Geología	Ocupación
				Salvany	Imagen	Seco	Húmedo			
20.1	Val Cenicera, Más de Sebastián. Costra	4589900	724680	Yeso	Lr_Cz	10YR7/2	10YR6/2	Costra	Yeso < 5 %. Val rodeado de yeso	Barbecho
20.1	Suelo	4589900	724680	Yeso	Lr_Ar_Cz, Lr	10YR6/2	10YR5/2			
20.2	Cuartana, Costra	4588560	723300	Yeso	Lr_Cz	10YR7/2	10YR5.5/3	Costra. Pedregosidad < 25 %	Caliza, yeso < 10 %	Barbecho
20.2		4588560	723300			10YR6/2.5	10YR5/3			
21.1	Costra blanca	4589962	740722	Caliza	Yeso	> 10YR8/1	> 10YR8/1	Costra	Yeso nodular blanco y rosáceo	Herbáceas
	Costra gris	4589962	740722	Caliza	Yeso	10YR7/1	10YR6/2 5/2			
21.2	Suelo	4589962	740722	Caliza	Yeso	10YR8/2	10YR7/2	Costra	Yeso nodular blanco	Barbecho
	Costra	4589993	740722	Caliza	Yeso	> 10YR8/1	10YR7/2			
	Suelo	4589993	740722	Caliza	Yeso	> 10YR8/1	10YR7/3			
22.1	Costra	4587435	750329	Yeso	Aluvión-14c	10YR7/3	10YR6/4	Costra Loma	Caliza	Cebada
	Suelo	4587435	750329	Yeso	Yeso, 12 y 8 clases	10YR6/3	10YR4/3			
22.2	Costra y suelo muy similares	4586337	752072	Yeso	Aluvión -14c	10YR5/2	10YR4/2	Costra, loma suave	Caliza >> yeso nodular	Cebada
23.1	Corral de Fangio	4586870	750350	Yeso	Lv_Cz_Y, Aluvión	10YR6/3	10YR4/3	Costra	Caliza, yeso <5%	Barbecho
23.1	Costra	4586870	750350	Yeso	Lv_Cz_Y, Aluvión	10YR6/3	10YR4.5/3			
23.2		4586870	750350	Yeso	Lv_Cz_Y, Aluvión	10YR7/1	10YR6/2	Costra	Yeso < 1/4 ha	Barbecho
23.2	Costra	4586870	750350	Yeso	Lv_Cz_Y, Aluvión	10YR8/2	10YR6.5/2			

Continuación del anexo III.1

Sitio	Nombre	Latitud Norte, UTM	Longitud Oeste, UTM	Litología		Datos de campo				
						Color		Condición del suelo	Geología	Ocupación
				Salvany	Imagen	Seco	Húmedo			
BG	Balsa Gelsa. Costra	4587990	715847	Lr_Cz	Yeso	10YR8/1	2.5Y7/2	Costra blanda	Yeso nodular	Pino, almendro
BG	Suelo	4587990	715847	Lr_Cz	Yeso	10YR7/1	2.5Y6/2			
EGV	Entronque Gelsa, Val Suelo	4595707	720838	Yeso	Yeso	10YR7/1	10YR5/2	Costra	Relleno de val	Labrado
		4595707	720838	Yeso	Yeso	10YR7/2	10YR5/2			
EGL	Entronque Gelsa, Loma	4595730	720875	Yeso	Yeso	10YR8/1	10YR8/2	Costra, parte alta de la loma	Yeso nodular y espejuelo	Herbáceas, líquenes
EGL	Suelo	4595730	720875	Yeso	Yeso	10YR7/1	10YR7/2			
EGL	Costra	4595730	720875	Yeso	Yeso	10YR8/2	10YR7/3			
EGL	Suelo	4595730	720875	Yeso	Yeso	10YR7/2	10YR6/3			
AA	Amarga Costra	4587101	746280	YD	YD, Yeso	10YR8/2	10YR6/2	Costra	Yeso nodular y farinoso	Barbecho
AA	Suelo	4587101	746280	YD	YD, Yeso	10YR7/2	10YR5/3			
AB	Amarga Baja	4588195	748502	YD	Yeso, Lv_Y_Cz	10YR7/2	10YR6/2	Costra discontinua, arenosa	Yeso subsuperficial	Salada
CN-II	Carretera nacional II Gelsa Zaragoza	4598248	718240	Yeso	Yeso			Lomeríos suaves	Yeso nodular	Herbáceas
R1.1	Rojo 1	4591991	745046	Cz	Lv_Cz_Y	7.5YR6/4	7.5YR4/6	Sello	Caliza, lutita	Barbecho
R2.2	Rojo 2	4591995	745099	Cz	Lv_Cz_Y	10YR5/3	10YR4/3			
C1	Corral de la Coca	4590720	745260	Cz	Cz	10YR8/1	10YR8/2	Costra blanda	Yeso blanco farinoso < 1/8 ha Caliza	Labrado
C2	Suelos	4590781	745294	Cz	Cz	10YR7/2	10YR6/2	Costra, piedras		
C2	Costra	4590781	745294			10YR8/2	10YR7/2			
P	Piñol, Lr	4588225	729064	Lr Ar Cz	Lr_Cz, Lr	7.5YR6/4	7.5YR4/4	Sello	Lutita roja	Cebada
37.0	Salada 37	4589875	733545			Similar a la salada Valdefrancín				
	Chamarqueta	4589233	733468			Similar a la salada Valdefrancín				

Cz: Caliza; Lv: Lutita verde; Y: Yeso; Lr: Lutita roja; Ar: Arenisca; YD: Yeso en depresión



## **CAPÍTULO IV.**

### **MORFOLOGÍA Y TAXONOMÍA DE SUELOS YESOSOS**

#### **RESUMEN**

Mediante el estudio micromorfológico, DR-X y taxonómico de 16 perfiles de suelos yesosos del estado de San Luis Potosí (11 en la Zona Media y 5 en el Altiplano) se genera, por un lado información nueva y por otro se actualiza la existente. Así con el análisis de secciones delgadas de suelo se describen los aspectos micromorfológicos de suelos ricos en yeso, hasta el momento sin información de ésta índole sobre estos suelos en México. También por difracción de rayos X se indaga la mineralogía característica de este tipo de suelo, aspecto poco estudiado por lo que se aporta información nueva para México. Mediante la descripción y caracterización de los perfiles de suelo, junto con la micromorfolología y mineralogía, se genera y actualiza la clasificación de los suelos yesosos, según los criterios actuales de Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999) y de la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB, 1999). La información generada y actualizada es relevante para conocer y entender el comportamiento de los suelos ricos en yeso ante el manejo, y que necesariamente repercute en su uso racional y en la investigación.

## 1. INTRODUCCIÓN.

La clasificación de los suelos refleja el estado del conocimiento del arte y del conocimiento del campo (Buol *et al.*, 1997) y tiene varios objetivos o propósitos tales como: organiza el conocimiento del objeto (suelo); proporcionar un máximo conocimiento acerca del objeto (suelo) con el menor esfuerzo cognoscitivo (percibir, renombrar, y memorizar las propiedades); proveer un mapa o carta organizacional de la estructura del mundo que percibimos y en el que vivimos, para satisfacer nuestra natural curiosidad y facilitar la comunicación; identificar el mejor uso y estimar su productividad, entre otros (Buol *et al.*, 1997; Tavarez, 1996). La clasificación de suelos se hace necesaria para ordenar y transmitir los conocimientos, posibilitando la generalización y la transmisión de la experiencia adquirida (Kubiëna, 1952) y transferencia de tecnología evitando fracasos (Porta *et al.*, 2003).

La información existente en México sobre las características físicas y químicas de los suelos yesosos es limitada, varios de los estudios se relacionan con características ecológicas (Johnston, 1941; Gómez, 1973; Mellink, 1989; Mellink y Madrigal, 1993; Meyer y García, 1989; Meyer *et al.*, 1992; Ceballos *et al.*, 1993). Los pocos datos sobre clasificación son obsoletos debido al gran avance que ha tenido ésta en los últimos años (FAO/UNESCO/ISRIC, 1988; WRB, 1999; Soil Survey Staff, 1999). Por otra parte la micromorfología y mineralogía son indispensables en muchos casos para la correcta clasificación de un suelo [son importantes para caracterizar horizontes y propiedades de diagnóstico, procesos formadores, etc.] y en México estos datos prácticamente son inexistentes. En las áreas yesosas de México, al no haberse estudiado estos dos aspectos la clasificación se hace con datos faltantes, siendo ésta de dudosa calidad y solamente se puede hablar de clasificaciones tentativas (Gutiérrez, 1997).

Ante la necesidad de estudios sobre los suelos yesosos, en este trabajo se aborda la taxonomía, los aspectos micromorfológicos y mineralógicos de los suelos yesosos de la Zona Media y del Altiplano Potosino.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

La revisión de literatura sobre suelos yesosos comprende aspectos tales como la, micromorfología, la morfología, el hábito de cristalización del yeso; los principales minerales asociados al yeso; la taxonómica, los conceptos de horizonte gypico, hipergypico, y petrogypico y estudios sobre clasificación de estos suelos en México.

**2.1. Micromorfología.** La micromorfología es el estudio de suelo sin disturbar con ayuda de un instrumento de ampliación, desde una simple lente de mano hasta el microscopio electrónico. El análisis micromorfológico consta de la colecta de datos (preparación de la muestra, observación y reporte) e interpretación. Permite determinar la disposición espacial de los componentes, con el fin de deducir su relación funcional, genética y cronológica.

El análisis micromorfológico es útil para conocer la génesis del material (por ejemplo si es heredado o neoformado), qué procesos han sido más activos y su secuencia (Stoops, 1986); tiene aplicación en clasificación, en paleo edafología, en arqueología, y en geomorfología; además tiene uso práctico, por ejemplo en el manejo de suelos para estudiar la compactación, formación de costra, degradación de la estructura, etc.

Como indican Eswaran *et al.* (1981), la micromorfología de suelos yesosos es muy característica. El yeso cristaliza en el sistema de huecos en forma de yeso lenticular. Los huecos pueden colapsar y el material pasar a la matriz del suelo. Agregan que algunas veces se puede apreciar descalcificación alrededor de los granos o agregados de yeso, indicando que la calcita se disolvió antes de la formación del yeso. Asimismo, la cristalización puede originar cristales grandes y pudiendo quedar algún material del suelo (arcilla, carbonatos, halita, etc.) incluido en el cristal, constituyendo puntos de debilidad en la estructura del mismo y por donde empieza la disolución. Estos autores agregan que el horizonte petrogypico toma muchas formas, puede estar compuesto de masa muy fina de yeso lenticular con empaquetamiento muy estrecho o denso, con cementación entre granos adjuntos, dándole rigidez al material.

Allen (1985) expresa que el yeso edafogénico puede aparecer formando grupos o de manera aislada. Frecuentemente se presentan en poros en forma macro o microscópica, a

lo largo de canales, y en huecos planares sin orientación aparente respecto al rasgo al que se asocia. También pueden tener orientación paralela a poros planares, o presentarse entrelazados o como masas microcristalinas y parece que no existe en mezcla íntima con la arcilla, más bien se da una segregación de componentes. El yeso algunas veces reviste en forma geopetal (“*pendent*” o “*pendant*”) a gravas u otros fragmentos gruesos. Se puede presentar más de una generación de cristalización, indicando formación secundaria. Así como una disposición concéntrica de cristales de varios tamaños alrededor del hueco.

Los suelos ricos en yeso han adquirido relevancia en las clasificaciones de suelos debido no sólo porque ocupan superficies importantes en las regiones áridas y semiáridas, sino y también porque la presencia de yeso en grandes cantidades restringe el uso de los suelos, tanto para la agricultura como para la ingeniería (Stoops e Ilaiwi, 1981).

Por otro lado, Herrero *et al.* (1992) cuando las formas de yeso total son parte importante de un horizonte o edaforrasgo, definen la fábrica gypsica formada por cristales de yeso como un tipo de fábrica-b cristalítica de Bullock *et al.*, (1985), pudiéndose aplicar cuando el yeso predomina en todo o parte de un horizonte o edaforrasgo. Los autores distinguen dos clases: fábrica gypsica lenticular caracterizada por cristales de yeso lenticular sin o con pocos componentes no yesosos entre ellos, tales como escasos granos de cuarzo o carbonatos tamaño limo; fábrica microgypsica caracterizada por yeso microcristalino. La superposición de esos cristales orientados aleatoriamente, origina una masa estadísticamente isotrópica al grosor estándar de la sección delgada. Herrero y Porta (1987) definen el término fábrica en islas para masas no yesosas (carbonáticas, limo arcillosas) de materia fina embebidas en un edaforrasgo cristalino gypsico, la cual es frecuente en suelos yesosos (Porta y Herrero, 1988).

**2.2. Morfología de los materiales yesosos del suelo.** Estos materiales adquieren varias morfologías, así se ha reportado la morfología bola de nieve (*snowball*), yeso vermiforme, yeso travertínico, y costra de yeso prismática.

**a) Bola de nieve (“*snowball*”).** Esta morfología es descrita como rasgo edafogénico por Van Hoesen (2000) y Buck y Van Hoesen (2002). Consiste de pequeñas (0.5 – 1.0 mm) esferas blancas pulverulentas, suaves y fácilmente transformadas a polvo con los dedos, independiente de la textura, pH, y horizonte genético y la consideran como una de las

primeras morfologías del material yesoso y forma parte del estado de gipsificación I (en forma análoga al proceso de calcificación propuesto por Gile *et al.*, 1966). Su presencia decrece drásticamente cuando se incrementa el contenido de yeso. Bajo el microscopio es fibrosa - granular con apariencia azucarada, reviste fragmentos y rellena huecos de antiguas raíces. El análisis SEM indica que está compuesta de varios hábitos del yeso, tales como tabular, pseudo hexagonal, hexagonal, y en listón plano (“*lath*”, forma hexagonal tabular con un eje más grande que el otro, Van Hoesen, 2000) soportado por matriz orgánica y actinomicetos revistiendo la superficie del yeso, y pequeñas colonias de bacterias en forma de dona o rosquilla (“*donut*”, Van Hoesen, 2000). El hábito del yeso en listón plano, según Van Hoesen (2000) y Buck y Van Hoesen (2002) es exclusivo de la bola de nieve.

**b) Yeso vermiforme.** A esta morfología Stoops e Ilaiwi (1981) la denominan pseudomicelio, término que Porta y Herrero (1988) proponen reservar para las acumulaciones finas de carbonato cálcico. Por su parte Grande (1987) lo nombra veniforme y lo relaciona con yeso depositado en huecos de antiguas raíces. En general, es el nombre de campo para acumulaciones de yeso que se aprecian a simple vista, a manera de pequeñas venas de algunos milímetros de largo y cerca de 1 mm de grosor. Bajo la lupa es blanco, pero no corresponde a micelios (Herrero *et al.*, 1992).

En sección delgada consiste de rellenos o revestimientos, generalmente de canales, de yeso lenticular de tamaño arena fina, sueltos (continuos o discontinuos) o densos (a veces incompletos) con gradación entre todos los tipos, variando de euhedral a anhedral de las lentes de yeso (Porta y Herrero, 1988; Herrero *et al.*, 1992; Poch *et al.*, 1998). Stoops e Ilaiwi (1981) dicen que se presenta en suelos con contenido de yeso < 20 % y se forma por cristalización de yeso desde soluciones, principalmente en bioporos.

**c) Yeso travertínico.** Esta morfología se adquiere al acumularse yeso en depósitos de gravas, y consiste en cementaciones con elevada porosidad y tendencia prismática que da aspecto de “migas de pan” (Artieda, 1996). En lámina delgada es muy poroso, a veces mayor al 50 %, constituido por elastos de naturaleza variada, entre ellos de yeso secundario con fábrica en “enrejado” como evidencia de procesos de disolución-precipitación (Artieda, 1996).

**d) Yeso poligonal.** Para Poch (1992) se trata de un tipo de acumulación masiva de yeso con estructura prismática típica. Según Tucker (1978) su rasgo característico es un patrón de fracturas poligonales, y para el norte de Irak reporta estructura poligonal y un 95 % de yeso, el resto corresponde a calcita, cuarzo, minerales arcillosos y materia orgánica. Al microscopio consiste en yeso subhedral a anhedral entrelazado; con planos de exfoliación importantes; los cristales comúnmente tienen extinción ondulada, y algunos granos presentan nubes de inclusiones diminutas posiblemente de minerales arcillosos o de materia orgánica (Tucker, 1978).

Para Watson (1979) es un tipo de costra evaporítica de yeso microcristalino pulverulento densamente empaquetado, con 75 a 95 % de yeso, presenta endurecimiento superficial, la desecación alternante puede ser suficiente para la formación de la estructura “columnar”. Posteriormente (1985, 1988) Watson la describe como costra “columnar” de 1 a 2 m de espesor, endurecida, compuesta principalmente por yeso menor a 50  $\mu\text{m}$ . La estructura “columnar” descrita por Watson (1979, 1985, 1988) posiblemente corresponda a prismática dado que la reporta en la superficie y con pH de 8.0 a 8.5. Las fracturas poligonales se pueden formar por diversos factores tales como variación del volumen ocasionado por cambios de temperatura diurna y estacional (Tucker, 1978), por contracción térmica (Kocurek y Hunter, 1986), por desecación (Lachenbruch, 1962; citados por Kocurek y Hunter, 1986), por acreción iluvial y exhumada posteriormente (Watson, 1988), o por deshidratación química parcial (Hunt *et al.*, 1966; citados por Watson, 1988).

**2.3. Hábito del yeso.** El hábito del yeso es muy diverso presentándose como lenticular, prismático, tabular, fibroso, entre otros.

**a) Yeso lenticular.** Es la forma o hábito más común de cristalización del yeso edáfico, se presenta tanto en lentillas simples como compuestas, dispuesto radialmente y en empalizada, lentillas imperfectas de gran tamaño, etc. Este hábito se presenta en tamaños mayores a 20  $\mu\text{m}$  (Porta y Herrero, 1988; Herrero, 1991). A los cristales lenticulares dispersos en la masa basal, Herrero (1991) los considera como edaforrasgos cuando mide menos de 2 mm. En campo es blanquizco y al tacto de sensación pulverulenta y arenosa (Herrero *et al.*, 1992). Esta morfología está relacionada a ambientes cálidos, barros ricos en NaCl conteniendo abundante materia orgánica

disuelta, siendo este último el factor principal, así como condición alcalina, así como las temperaturas más altas favorecen el hábito lenticular (Cody, 1979; Cody y Cody, 1988; Magee, 1991). En cambio el pH bajo contrarresta el efecto de la adsorción de materia orgánica y promueve el crecimiento prismático (Magee, 1991).

El NaCl, pH y en menor grado ácido tánico controlan la densidad de nucleación y cuando se combina alta temperatura con alta salinidad se incrementa el número de centros de nucleación según Cody y Cody (1988), aunque Jafarzadeh y Burnham (1992) experimentalmente produjeron yeso lenticular en ausencia de materia orgánica y de cloruro de sodio. Mees (1999a) cita varios trabajos en los que concluye que el yeso lenticular se forma en ambientes con presencia de sustancias orgánicas, de cloruro de sodio y con alta relación Ca/SO<sub>4</sub>, favoreciendo el desarrollo de formas planas euhedrales. La zonación de algunos cristales lenticulares debida a la inclusión de sedimento recuerda la ocurrencia de una forma no lenticular al inicio del crecimiento (Mees, 1999a); y los cristales con núcleos lenticular o bandas indican un crecimiento lateral del cristal, en todas direcciones dentro del plano de alisamiento.

**b) Yeso microcristalino.** Watson (1988) nombra como yeso microcristalino al yeso lenticular de tamaño menor a 50 µm. Amit y Yaalon (1996) denominan como yeso alabastrino al que tiene tamaño de grano de 5 a 20 µm, y mencionan que es blanco, blando y suave o terso como la harina. Para Porta y Herrero (1988), Herrero (1991), Herrero *et al.*, (1992) y Amit y Yaalon (1996) este tipo de yeso, bajo luz polarizada plana (LPP) tiene color amarillo tenue que se intensifica al cerrar el diafragma y con luz polarizada cruzada es opaco con frecuentes puntos birrefringentes correspondiendo a yeso lenticular; el tamaño de los cristales es menor a 20 µm, con sección en losange (rombo) con ángulos afilados (Porta y Herrero, 1988). Estos autores confirman el hábito lenticular por microscopía electrónica de barrido.

En campo se reconoce por su consistencia suave cuando está húmedo, similar a la harina, y de color en húmedo blanco a rosado y aspecto polvoriento, siendo denominado yeso farinoso o farináceo (Porta y Herrero, 1988; Herrero *et al.*, 1992; Artieda, 1996). Stoops e Ilaiwi (1981) indican que puede formar parte de la matriz de horizontes hipergypsicos y petrogypsicos.

En cuanto a la ubicación del yeso farináceo en el paisaje, Artieda (1996) en el valle del Ebro (Quinto, Zaragoza, España) lo encuentra en diversas posiciones, tales como: intercalado o en posición suprayacente a depósitos geológicos, intercalado entre estratos calizos, en posición somital, en contacto con “yeso roca” y cubriendo laderas, rellenando “vales” o formando coladas. Se puede presentar como relleno, como nódulos simples o compuestos, o asociado a raíces o canales, y se considera siempre como edáfico y cuando predomina en la sección delgada se describe como “masa basal gypsica microcristalina” cuya “fábrica-b es cristalítica gypsica microcristalina” (Porta y Herrero, 1988).

**c) Yeso prismático.** Se menciona (Cody, 1979) que el pH es el factor principal para la formación de yeso prismático, presentándose principalmente en condiciones ácidas, en estas condiciones el  $H^+$  reacciona con moléculas orgánicas deteniendo el crecimiento paralelo al eje c. Se presenta típicamente a pH alrededor de 4 y nunca arriba de 6, formándose en la base de fluctuaciones de capa freática (Jafarzadeh y Burnham, 1992). En ambientes cálidos, el agua salina decrece la densidad de nucleación y favorece el crecimiento de cristales mejor formados y más alargados, condiciones no necesarias para el yeso lenticular (Cody, 1979). Vizcayno *et al.* (1995) encontraron esta morfología en una salmuera de la región de Flumen-Monegros, España.

Para Amit y Yaalon (1996) este hábito prismático del yeso es raro en suelos áridos y es más común en ambientes lacustres, crece en soluciones libres de sedimentos a partir de soluciones saturadas con yeso pero sin materia orgánica, como en la interfase agua-salmuera o agua-sedimento. Mees (1999) también lo reporta en la cuenca de un lago seco (Omongwa Pan, Namibia), y su formación en salmueras saturadas seguida de eventos de inundación origina que los cristales contengan inclusiones de sedimento; coincide con los autores anteriores en que se forma en medio subacuático. Un hábito relacionado con el yeso prismático, casi en pirámide regular y alargado, es el **yeso acicular** y quizás su principal diferencia es su terminación en punta. El yeso acicular es característico de cristalización primaria en cuencas salinas (Jafarzadeh y Burnham, 1992).

**d) Yeso tabular** se presenta en suelos ricos en sales con fluctuaciones en la capa freática, a menos que la forma inicial sea lenticular (Eswaran y Zi-Tong, 1991). Jafarzadeh y Burnham (1992) lo describen como cristales planos con superficies basales bien desarrolladas, pudiendo ser pseudo rombohedral o pseudo hexagonal; se puede formar por una sobresaturación muy rápida seguida de secado rápido. Mees (1999) comenta que el yeso tabular, hemi-bipiramidal y el lenticular experimentan una inhibición del crecimiento en la dirección paralela a la cara [001], y reporta el yeso tabular formándose en huecos rellenos de salmuera y agrega que este hábito es raro en condiciones naturales.

**e) Yeso tubular.** Para Jafarzadeh y Burnham (1992) puede corresponder a los “tubos de cristal” de Miedema *et al.* (1974) y consiste de canales rellenos presentes como edaforrasgo en suelos de sulfato ácido, conformados por muchos cristales; sin embargo en su trabajo corresponden a cristales simples con alargamiento en el eje c y con caras fuertemente curvadas. Los mismos autores agregan que también puede ser que el cilindro crezca alrededor de un iniciador (“*former*”) como la raíz, la cual posteriormente desaparece, crecimiento favorecido por un pH ácido, similar al necesario para la formación del yeso fibroso. Para Poch (1996) la morfología de “tubo” es el resultante del revestimiento de poros.

**f) Yeso fibroso** (espató satinado, “*satin spar*”). A diferencia del acicular, es curvado y/o ondulado, y carece de terminaciones en punta; también cristaliza bajo tensión, en forma desplazante ensanchando grietas (Eswaran y Zi-Tong, 1991; Jafarzadeh y Burnham, 1992). Para Porta y Herrero (1988) el yeso fibroso es raro en los suelos, no lo consideran de origen edáfico y está formado por cristales subparalelos perpendiculares a la vena.

**g) Rosa del desierto.** Consiste en cristales de yeso lenticular con inclusiones de matriz del suelo, típicamente arena, y unidos radialmente para formar una estructura semejanado una flor. La incorporación de la matriz se debe al crecimiento rápido y constante donde la migración iónica hacia el cristal en crecimiento es mayor a la velocidad a la cual es desalojado el material hospedante. Estas condiciones se dan cerca de la capa freática donde el reemplazamiento de agua saturada con yeso es constante (Jafarzadeh y Burnham, 1992; Kastner, 1970, citado por Jafarzadeh y Burnham, 1992).

**2.4. Principales minerales de suelos yesosos.** El conocer los minerales del suelo permite establecer relaciones edafogénicas entre ellos y con el material subyacente, indagar sobre la formación del suelo y en aspectos productivos. El tipo de arcilla mineral en un suelo influye en sus propiedades fisicoquímicas, incluyendo capacidad de intercambio catiónico, estructura, humedecimiento y secado, y propiedades de laboreo (FAO, 1990), de ahí la importancia de su conocimiento.

En la fracción fina de suelos yesosos se han reportado varias arcillas tales como la clorita, montmorillonita, illita, vermiculita, sepiolita, caolinita y paligorskita o atapulgita (FAO, 1990), a veces con dominancia de alguna de ellas. Así en varios horizontes gypsicos de Irak Barzanji *et al.*, (1975, cita FAO, 1990) la atapulgita representó del 40 al 80 % de los minerales arcillosos y encontraron una alta significancia linear ( $r = 0.963$ ) entre el yeso y la atapulgita; agregan que este mineral se forma después del yeso y que con el incremento de la precipitación la atapulgita decrece y se incrementa la montmorillonita. Yaalon y Wieder (1976, citados por Eswaran y Zi-Tong, 1991) sugieren que la autigénesis de la paligorskita toma lugar a expensas de las esmectitas y que el proceso acontece en asociación con una inversión diagenética de calcita alta en magnesio a calcita baja en magnesio.

Varios autores (Mottana *et al.*, 1975; Eswaran y Zi-Tong, 1991; Herrero, 1991; entre otros), comentan que el yeso al deshidratarse se transforma primero en bassanita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) y luego en anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ), esta última por hidratación se convierte nuevamente en yeso. La bassanita es metaestable y se hidrata fácilmente pasando nuevamente a yeso (Eswaran y Zi-Tong, 1991). Para Eswaran *et al.* (1981) la bassanita y anhidrita son raras en suelos y si están presentes son heredadas con el sedimento. Su presencia también puede estar relacionada a deshidratación parcial de yeso por altas temperaturas o presencia de soluciones salinas muy concentradas (Mees, 1998).

Para Eswaran *et al.* (1981) y Eswaran y Zi-Tong (1991) algunos de los minerales más frecuentes asociados con el yeso son la mirabilita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), tenardita ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), epsomita ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), hexahidrita ( $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ), bloedita [ $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ], etc., todos ellos más solubles que el yeso, consecuentemente reflejan una condición ambiental específica; ocurren como eflorescencias y su estabilidad es función de la temperatura; por ejemplo la mirabilita se forma en invierno y en verano se transforma a tenardita por

deshidratación. La celestina ( $\text{SrSO}_4$ ) también se ha encontrado en suelos yesosos (Porta, 1986; Herrero, 1991; Eswaran y Zi-Tong, 1991; Poch, 1992).

Por su parte Soria *et al.*, (2000) reportan sepiolita [ $\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ] en un suelo yesoso de San Luis Potosí, México. En siete suelos yesosos del anterior lugar, Soria (2004) encontró calcita, feldespatos, vidrio volcánico, anfíboles, piroxenos (hiperstena, augita), olivinos (fosterita), magnetita e ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ). Otros minerales frecuentes son la halita ( $\text{NaCl}$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) y cuarzo (Eswaran *et al.* 1981). En un suelo yesoso de México, Grande (1967) reporta predominio de montmorillonita en el horizonte superficial e illita en el subsuperficial. La illita presente en casi todos los sedimentos y puede servir de precursora de las esmectitas (Eswaran *et al.*, 1981).

**2.5. Clasificación de suelos.** El tratamiento taxonómico de los suelos yesosos está, como no podía ser de otra forma, relacionado con el área geográfica donde se ha desarrollado la taxonomía. Así Huguet del Villar (1929) propone nombres de suelo apoyándose en su conocimiento de los suelos españoles y su vegetación, e incluso hace uso del lenguaje popular, por ejemplo para suelos yesosos propone el nombre *calvero*. Las “Claves sistemáticas de suelos” de Kubiena (1952) también se basan en el conocimiento de los suelos españoles, para suelos yesosos define el “Solonchak yesoso” con predominio de sulfato cálcico dentro de los suelos salinos, y a los suelos “Yerma de polvo salino” con yeso, anhidrita y sal y “Yerma de costra yesosa” con horizonte de yeso (Y) como parte de los “suelos brutos terrestres formando clímax”.

En Soil Taxonomy la clasificación de los suelos yesosos ha ido evolucionando, al irse incorporando el conocimiento de los suelos de las regiones más áridas de U.S.A. Así Soil Survey Staff en 1975 consideraba a los suelos yesosos a nivel de gran grupo (Gypsiorthids) y los horizontes Gypsic y Petrogypsic, y desde 1994 incluye el suborden Gypsids dentro de los Aridisols, este suborden es confirmado en la segunda edición de Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999). Los avances también se dan en la FAO/UNESCO, así en 1968 define las fases gípsica y la petrogípsica, y la FAO/UNESCO/ISRIC (1988) crea la unidad gipsisoles, es tratada a nivel de grupo de referencia en la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB, 1999); además, consideran el material de diagnóstico gipsírico para suelo con al menos 5 % de yeso en volumen, sin atender a su génesis. Los franceses

consideran a las áreas con alto contenido de yeso a nivel de segundo orden, ya que crearon la subclase de suelos yesosos con dos grupos y dos subgrupos (CPCS, 1967).

En México y en específico en el semidesierto yesoso de San Luis Potosí, la primera referencia en taxonomía es el trabajo de Grande *et al.* (1967) en los que utilizan el término “calco-yesífero” para suelos donde el  $\text{CaCO}_3$  domina sobre el yeso, y “yesífero definido” cuando se desarrolla a partir de un estrato portador de yeso, y clasifican con base a Soil Survey Staff (1960). Por su parte CETENAL desde 1971 y para el estado de San Luis Potosí utiliza la leyenda de suelos de la FAO (1968). La clasificación de suelos avanza con el desarrollo de los sistemas taxonómicos, así Aguilera *et al.* (1997) clasifican dos perfiles yesosos de SLP, México de acuerdo a Soil Survey Staff (1990) y Soria (2004) utiliza Soil Survey Staff (1999) y WRB (1999).

Respecto al horizonte genético, varios autores proponen las denominaciones de horizontes **Y** e **Ym**. Así, para Porta y Herrero (1988) y Herrero (1991) **Y** es el horizonte de acumulación de yeso que cumple las exigencias para gypsico y se corresponde con un  $B_y$  de la FAO. Según Porta *et al.* (1977) el horizonte Y se ha formado por acumulación secundaria de yeso de apariencia harinosa o pulverulenta, no cementado, se compacta cuando seco tendiendo a formar costra difícil de penetrar con el cuchillo, pero un fragmento seco se deshace en agua. En campo se describe como acumulación generalizada de yeso (más del 50 % en volumen), no está cementado y es independiente de su posición en el perfil (puede estar en A o en C), y sin evidencias claras de ser detrítico (Artieda, 1996, 2004; Artieda y Herrero, 2003). Para Artieda (1996, 2004) la utilización de este horizonte resulta satisfactoria sobre todo cuando el horizonte superficial es yeso farináceo o yeso lenticular milimétrico.

Porta y Herrero (1988) y Artieda (1996, 2004) proponen la nomenclatura **Ym** para el horizonte Y que no se deshace en agua al sumergirlo por 24 horas, se corresponde con un  $B_{ym}$  de FAO (Porta y Herrero, 1988). En los suelos estudiados por Artieda (1996, 2004) consiste de yeso travertínico o yeso farináceo muy compacto no trabajable con cuchillo. Artieda (2004) tanto al horizontes Y como al Ym que propone los menciona entre paréntesis.

El horizonte Cy para Poch (1992) es un horizonte C con acumulación de yeso, usualmente como cristales de yeso pulverulento relleno de grietas verticales, o como capas horizontales de yeso puro alternando con materiales libres de yeso, y By es un horizonte con matriz carbonática-silicática y con acumulación de yeso como cristales grandes, yeso vermiforme o nódulos. Para Artieda (2004) Cy corresponde a capas de arena o grava con acumulaciones de yeso que no llegan al 1 % en volumen, y el horizonte By es el B con evidencias de acumulación de yeso (más del 1 %) y sin estructura.

**2.5.1. Horizonte gypsico.** Según WRB (1999) el horizonte gypsico es un horizonte no cementado que contiene acumulaciones secundarias de yeso en diversas formas, los criterios de diagnóstico son: 15 % o más de yeso (con yeso  $\geq$  60 % se denomina hipergypsico) y espesor de 15 cm o más, también para el horizonte hipergypsico. Para Soil Survey Staff (1999) corresponde a un horizonte iluvial en el que el yeso se ha acumulado en cantidad significativa y reúne todas las características siguientes: debe tener un espesor  $\geq$  15 cm; no debe estar cementado o endurecido a tal grado que reúna los requisitos para horizonte petrogypsico; debe tener 5 % o más de yeso y 1 % o más (por volumen) de yeso secundario visible; el producto del espesor, en cm, por el porcentaje de yeso debe ser mayor o igual a 150.

En campo el yeso puede encontrarse en forma de pseudomicelio, como cristales de tamaño grueso (individualizados, como nidos, revestimientos, agrupamientos alargados de cristales fibrosos) o como acumulaciones pulverulentas compactas (WRB, 1999).

En los suelos donde el yeso es ubicuo existen dudas al aplicar la definición de horizonte gypsico establecida en Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999), que exige al menos un 1 % de yeso secundario visible con frecuencia difícil o imposible de determinar (Poch, 1992; Artieda, 1996, 2004; Herrero, 2004). Por la naturaleza semisoluble del yeso, cambios en el clima y en uso de la tierra se tienen ciclos sucesivos de disolución – precipitación, teniéndose un amplio intervalo de acumulaciones de yeso, y éstas solamente se pueden considerar como secundarias solamente si son discriminadas en campo (Poch, 1992); la autora agrega que es prácticamente imposible decir cuál yeso fue primero y cual después. Aunado a ello en Soil Taxonomy no dan criterios para distinguir el *yeso secundario visible* o primario del *yeso no secundario* (Artieda, 1996) o heredado (Artieda, 2004). En muchos casos es imposible distinguir el yeso heredado o litogénico del edafogénico, tanto en

campo como en secciones delgadas, cuestión que por otro lado no tiene repercusión funcional (Porta y Herrero, 1988; Poch, 1992; Artieda, 1996; Herrero y Porta, 2000; Herrero, 2004).

Artieda (1996) menciona inconvenientes para distinguir el yeso heredado del acumulado (de precipitación primaria) en el suelo cuando i) el yeso del horizonte es lenticular en un alto porcentaje; ii) cuando se tienen presentaciones de yeso de pequeños tamaños que no permiten decidir si se trata de relictos clásticos o bien de litorrelictos de yeso o de disolución de cristales lenticulares de yeso mayores; o iii) cuando se trata de aplicar la definición de gypsic a horizontes de yeso lenticular microcristalino, que se presenta casi puro o con materiales silicáticos o carbonatados, y además coexiste con yeso lenticular de tamaños mayores. Artieda (1996) señala que el origen de esas formas de yeso es banal en cuanto a su comportamiento agrícola, ambiental o edafogénico.

De igual manera, los términos iluvial o enriquecimiento son poco apropiados en ambientes con yeso ubicuo y/o en suelos cuyo régimen de humedad es no percolante (Herrero y Porta, 2000; Herrero, 2004). Algunos problemas del horizonte gypsic se obviarían si se aceptara la propuesta de ICOMID, la cual resulta muy práctica, dada la limitada información disponible acerca de la morfología y génesis de horizontes yesosos a nivel mundial (Herrero, 1991). Al no considerar la condición iluvial se evitan los problemas con los horizontes yesosos en la superficie y que lógicamente no serían iluviales, así Artieda (1996) obvia la condición iluvial y considera como yeso edáfico el que aparece en campo como nódulos friables, vermiforme, lenticular.

**2.5.2. Horizonte hipergypsic.** El ICOMID, (Eswaran y Zi-Tong, 1991) propone el horizonte hipergypsic, al que se le exige un contenido de yeso mayor o igual a 60 %, espesor de al menos 15 cm y cementación lo suficientemente débil como para que un fragmento seco se deshaga en agua o que tenga fracturas separadas por menos de 10 cm por las que puedan penetrar las raíces. Esta definición obvia algunos de los inconvenientes mencionados en párrafos anteriores al eludir la distinción entre yeso primario y secundario. La WRB (1999) lo utiliza a nivel de unidad de nivel inferior, pero en la Soil Taxonomy no se usa el término hipergypsic (Soil Survey Staff, 1999).

Herrero *et al.* (1992) definen el horizonte hipergypsico al horizonte con acumulación de yeso mayor o igual al 50 % sin necesidad de que sea de origen genético. Poch (1992) y Artieda (1996) adoptan el horizonte hipergypsico propuesto por el ICOMID, el segundo autor de acuerdo a los suelos estudiados propone varios subgrupos dentro de los Hypergypsid, así como el subgrupo Fluventic en Haplogypsid y Calcigypsid. Por su parte Toomanian *et al.* (2003) basándose en la influencia del yeso en la zona radicular y al restringir el desarrollo de las plantas, sugieren que un horizonte sea hipergypsico a partir del 40 % de yeso. Además los horizontes hipergypsicicos se caracterizan por que las raíces no los pueden penetrar aunque no estén cementados pero sí endurecidos (Poch, 2005 comunicación personal; Porta *et al.*, 1977).

**2.5.3. Horizonte petrogypsico.** En la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB, 1999) se define el horizonte petrogípsico como un horizonte cementado con acumulaciones secundarias de yeso, sus criterios de diagnóstico son: debe tener 60 % o más de yeso; cementación hasta el grado de que los fragmentos secos no se disgregan en agua y no puede ser penetrado por raíces; espesor  $\geq 10$  cm. En secciones delgadas presenta microestructura con pocas cavidades; matriz compuesta de cristales de yeso lenticulares en empaquetamiento denso con pequeñas cantidades de material detrítico; matriz con color amarillo débil en LPP; nódulos irregulares consistentes de agregados coherentes de cristales con fábrica hipidiotópica o xenotópica asociados a poros o a edafotúbulos (WRB, 1999). Artieda (1996) indica la necesidad de comprobar mediante microscopía si hay engarce mutuo de los cristales de yeso que daría un comportamiento mecánico permanente, tal como sucede en dos suelos por él estudiados, rasgo que no encontró en horizontes farináceos ni en otros horizontes gypsicicos.

Para la Soil Survey Staff (1999) este horizonte es iluvial de 10 cm o más con acumulación de yeso secundario en cantidad tal que se haya cementado o endurecido, y los fragmentos secos no se disgregan o desbaratan en agua y las raíces solamente pueden penetrar por fracturas verticales de 10 o más cm de separación, el contenido mínimo de yeso es 5 % y el producto del espesor en cm por el porcentaje de yeso debe ser de 150 o mayor. Debe reunir los requisitos de: estar cementado por yeso con o sin la presencia de otros cementantes; debido a su continuidad lateral, las raíces solamente pueden penetrar a lo largo de fracturas verticales con espaciamiento horizontal de 10 cm o más; y espesor de 10 cm o más; tener 5

% o más de yeso, y el producto de su espesor, en cm, multiplicado por el contenido de yeso en porcentaje es 150 o más.

Soil Taxonomy no explica el término “cementación” y cemento sería la materia mineral precipitada químicamente en el seno de un material hospedador (Artieda, 1996). El yeso puede ser considerado un cemento y por tanto en horizontes con 90 % de yeso el concepto de cementación no parece apropiado (Herrero y Porta, 2000), y se daría la paradoja de estar ante un horizonte que es todo cemento (Artieda, 1996). Herrero y Porta (2000) y Herrero (2004) señalan que el criterio mecánico, resistencia a la ruptura, de identificación en campo, aunque útil, se debe tomar con cuidado ya que los primeros centímetros de algunos horizontes yesosos se pueden endurecer por insolación, o por laboreo al ser susceptibles de desarrollar suela de labor (Poch, 2005, comunicación personal), e inducir su identificación como petrogypsico. Al considerar la condición de no deshacerse en agua, algunos horizontes gypsicos cumplirían la condición de horizontes cementados. Un criterio micromorfológico es la presencia de yeso xenomórfico (Poch, 2005; comunicación personal).

**2.5.4. Clasificación de suelos yesosos en México.** La clasificación de suelos usada en los mapas de CETENAL o INEGI es la propuesta por FAO/UNESCO (1968), el cual formalmente no es un sistema taxonómico, y al presente se tiene el problema de actualizar mapas al haberse modificado los sistemas de clasificación (Ortiz y Gutiérrez, 2000). Otra carencia es que a menudo los suelos los clasifican a partir de datos generados para otros fines (por ejemplo para fertilidad) lo cual provoca errores en la clasificación, al no aplicar los métodos específicos (Gutiérrez, 1997).

Con las carencias mencionadas, aplicables a los suelos yesosos, en San Luis Potosí estos suelos fueron clasificados por CETENAL (1971, 1972, 1973 y 1975) e INEGI (1981) como Xerosoles y Yermosoles gípsicos. Lagunes (1985) clasificó como Yermosol gípsico a un suelo ubicado en Palo Blanco, Guadalcázar, SLP, con FAO/UNESCO/ISRIC (1970) y a otro como Typic Gypsiorthid, con Soil Survey Staff (1975). Por su parte, Grande *et al* (1967) y Grande (1987) de acuerdo a USDA (1962) reporta un perfil yesoso al sur de El Carmen, Matehuala, SLP, clasificándolo como Calcorthids por presentar un horizonte de acumulación de yeso. Daunicht y colaboradores (1976) reportan un “Gypsic Yermosol” a la altura del Km 123 de la carretera San Luis Potosí - Matehuala.

Aguilera *et al.* (1997) comentan que el desarrollo de los suelos yesosos y calizos de las regiones con régimen de humedad ústico - arídico de México, es muy escaso, a veces se puede presentar el horizonte B cámbico, la alteración química es muy pequeña y existe redistribución de carbonatos y yeso. Agregan que el material originario está formado por sedimentos evaporíticos (yeso), margas y aluviones y por su naturaleza configuran una topografía muy llana, con suelos muy porosos y estabilidad estructural baja, sensibles a erosión eólica e hídrica.

En el estado de San Luis Potosí, a dos suelos con régimen de humedad arídico cercano al ústico y epipedión ócrico Aguilera *et al.* (1997) los clasifican de acuerdo a Soil Survey Staff (1990) como Ustochreptic Gypsiorthid y Ustochreptic Calci-Gypsiorthid y según FAO (1989) como Gipsisoles cálcicos. Soria (2004) estudia seis suelos yesosos en la Zona Media y uno en el Altiplano y los clasifica según Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999) como Ustic Haplogypsid y Gypsic Calciustoll, y con WRB (1999) como Gipsisol y Kastanozem.

### **3. OBJETIVOS.**

Los objetivos particulares del presente capítulo son:

- a) Realizar la descripción, caracterización y clasificación de los suelos yesosos de la Zona Media y Altiplano Potosino.
- b) Efectuar la caracterización micromorfológica de los principales tipos de suelos yesosos de la Zona Media y Altiplano Potosino.
- c) Conocer los principales minerales de los suelos yesosos de la Zona Media y Altiplano Potosino.

### **4. MÉTODO.**

**4.1. Localización.** El área de estudio comprende a las zonas yesosas del Altiplano Potosino y Zona Media delimitadas en el Capítulo II (Mapas II.4 y II.5 del Anexo II.2).

El método de trabajo diseñado para el logro de los objetivos planteados en el presente capítulo se muestra esquemáticamente en la Figura IV.1.

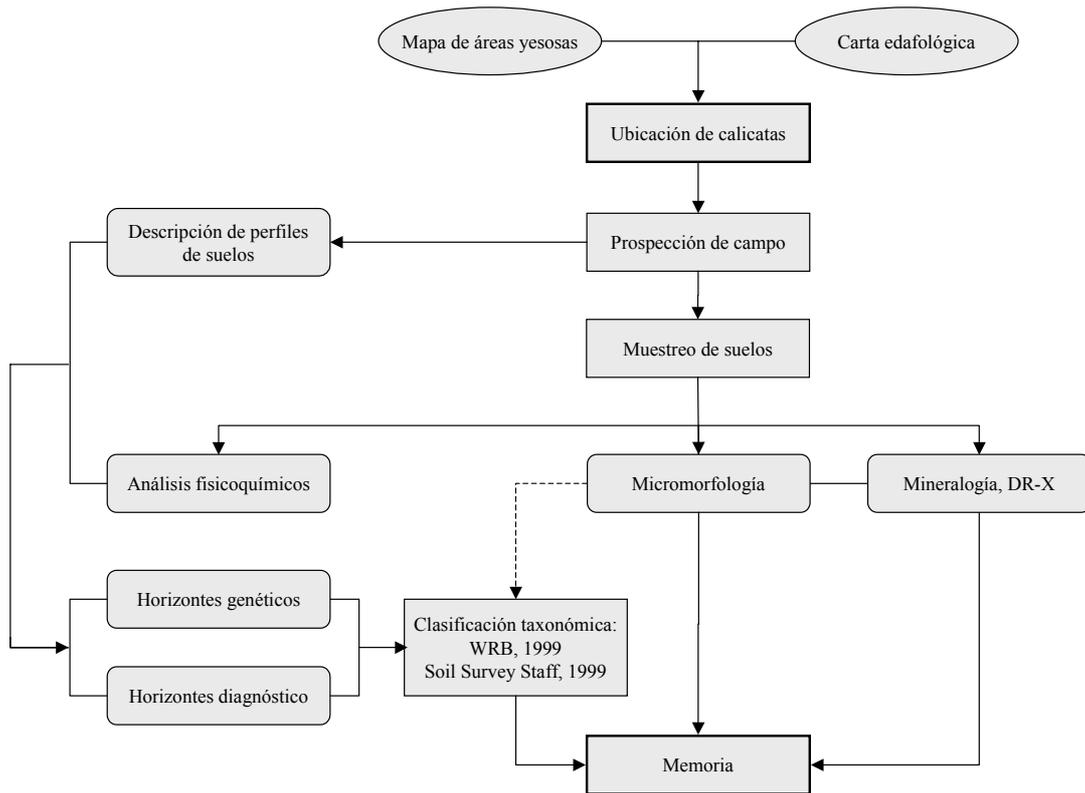


Figura IV.1. Esquema del método de trabajo.

**4.2. Ubicación de las calicatas y descripción de perfiles de suelos.** Con base a la cartografía generada en el segundo capítulo y a la existente sobre suelos, geología y vegetación se ubicaron 16 calicatas de suelos (Figura IV.2) tratando de abarcar la variabilidad de las áreas yesosas respecto a la geomorfología, clima, geología adyacente, vegetación, posición en el paisaje, y en colonias del perrito de las praderas (*Cynomys mexicanus*). En la Zona Media se describen 11 perfiles y 5 en el Altiplano.

En campo se describió el sitio donde se ubica la calicata tomando las coordenadas geográficas (GPS Garmin XL12), altitud, geología, posición, vegetación, uso, etc. Se describió el sitio y el perfil de suelos en cada uno de sus horizontes siguiendo los criterios de Cuanalo (1979). Las calicatas en las que se describió el perfil se abrieron ex profeso, excepto en el P7 en el que se aprovechó el hoyo de extracción de cuartón.

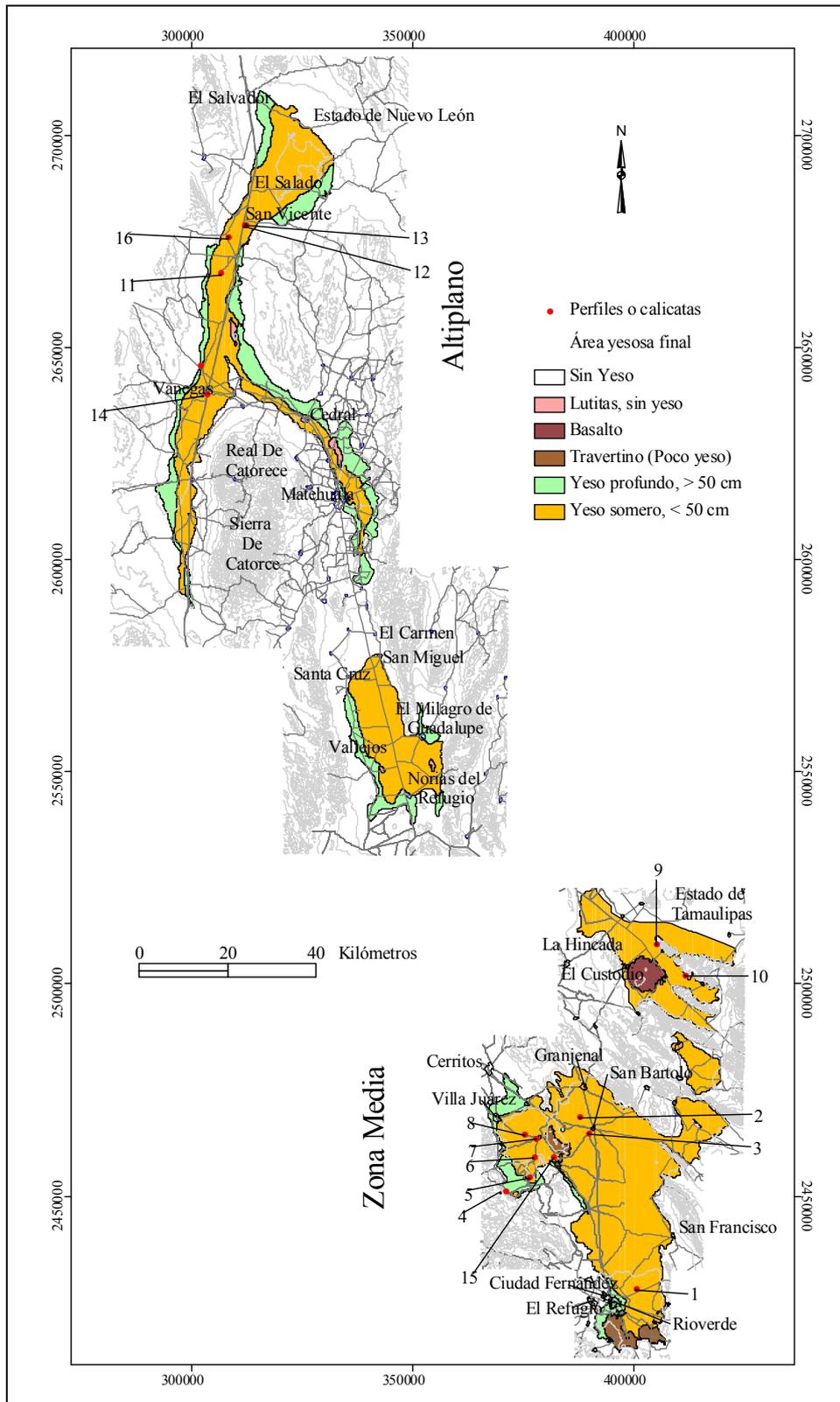


Figura IV.2. Localización de las calicatas en el Altiplano y en la Zona Media, San Luis Potosí.

**4.3. Muestreo de suelos.** Se tomó una muestra alterada de suelo de cada horizonte para los análisis fisicoquímicos. Para el estudio micromorfológico se tomaron muestras inalteradas utilizando un muestreador tipo Kubiena de 6 cm de ancho por 10 de largo, hecho con lámina galvanizada (Figura IV.3).



Figura IV.3. Muestreo de suelos para el análisis micromorfológico.

**4.4. Análisis físicos, químicos y clasificación.** El siguiente paso consistió en el secado al aire, molienda y tamizado con abertura de malla de 2 mm de las muestras de suelo, para su posterior análisis fisicoquímico. Los análisis fisicoquímicos se efectuaron en el Departamento de Edafología del Colegio de Postgraduados, México, según los procedimientos descritos por Van Reewijk (1999) y cuando no es así se menciona la técnica utilizada, por ejemplo para el  $\text{CaCO}_3$  equivalente.

**Tamaño de partículas.** Se analizaron las partículas  $< 2$  mm por el método de la pipeta eliminando la materia orgánica. Se consideró un tamaño  $\geq 50$   $\mu\text{m}$  para la arena (Ar), 2-50  $\mu\text{m}$  para limo (L), y  $< 2$   $\mu\text{m}$  para arcilla (Ac). Dada la imprecisión de la granulometría por sedimentación en muestras de suelo con contenido yeso mayor al 15 % (Artieda, 2004), el tamaño de partícula se determinó en muestras con contenido en yeso menor al 15 %.

**pH.** Se midió en relación suelo:agua 1:2.5 utilizando un potenciómetro.

**CO.** Para determinar el carbono orgánico se siguió el procedimiento de Walkley-Black.

**P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.** Se determinó el fósforo soluble en ácido cítrico al 1 %.

**Dap.** La densidad aparente se determinó con el método de la probeta.

**CIC.** Para la capacidad de intercambio catiónico se aplicó el método de Sholleberg y Simon con  $\text{NH}_4\text{Oac}$  1N a pH 7.0 en tubos de percolación.

**Ca y Mg intercambiables.** Fueron extraídos con  $\text{NH}_4\text{Oac}$  1N, pH 7.0 y determinados por complejometría con EDTA. En suelos yesosos debido a que el calcio soluble es alto origina sobreestimación del Ca intercambiable ( $\text{Ca}_{\text{int}}$ ) lo cual se aprecia en el valor de  $\text{Ca}_{\text{int}}$  considerablemente más alto que la CIC. Por eso Herrero (1991) recomienda determinar el  $\text{Ca}_{\text{int}}$  por diferencia. Criterio seguido en muestras con alto contenido de yeso.

**K y Na intercambiables.** Se extrajeron con  $\text{NH}_4\text{Oac}$  1N, pH 7.0 y se determinaron por espectrofotometría de emisión de flama.

**$\text{CaCO}_3$ .** El porcentaje de  $\text{CaCO}_3$  equivalente se siguió el método propuesto por Horton y Newson (1953) que consiste en la producción de  $\text{CO}_2$  al hacer reaccionar los carbonatos con ácido clorhídrico.

**Yeso.** El porcentaje de yeso equivalente se determinó agitando la muestra en agua y selectivamente se precipita en acetona el yeso disuelto, el precipitado se disuelve en agua y el yeso se determina midiendo la concentración de calcio en solución con el espectrofotómetro de absorción atómica a una longitud de onda de 427 nm.

**CE.** La conductividad eléctrica se midió en extracto de saturación con puente de conductividad, y se expresa a 25 °C.

**Ca y Mg solubles.** Se determinaron por complejometría con EDTA.

**K y Na intercambiables.** Se determinaron por espectrofotometría de emisión de flama.

**RAS.** La relación de adsorción de sodio del extracto de saturación se calculó con la fórmula  $\text{RAS} = (\text{Na}_{\text{sol}}) / \sqrt{[(\text{Ca}_{\text{sol}} + \text{Mg}_{\text{sol}}) / 2]}$

**PSI.** El porcentaje de sodio intercambiable se calculó con la fórmula  $(\text{Na}_{\text{int}} / \text{CIC}) \times 100$ .

**Color.** En muestra homogeneizada y determinado con la tabla de colores Munsell.

**Clasificación.** La clasificación de los suelos se hizo de acuerdo a Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999) hasta nivel de familia, y según la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB, 1999) hasta segundo nivel. En el caso de WRB (1999) se toman los nombres en castellano, por ejemplo Gipsisol, gípsico. Con Soil Survey Staff (1999) se conserva el nombre en inglés.

#### **4.5. Designación de horizonte diagnóstico y genéticos.**

**4.5.1. Horizontes genéticos y subíndices.** Ambos horizontes se designan según Soil Survey Staff (1999) y cuando no es así se mencionan las fuentes en las que se basa su descripción.

- A** Horizonte mineral formado en la superficie que no presenta en la mayor parte estructura del material original, tiene acumulación de materia orgánica, o rasgos debidos a labranza.
- B** Horizonte que presenta desarrollo de estructura en más del 50 % del volumen, o con acumulación de carbonatos (más del 5 %), o de yeso (más del 1 %), o de arcilla.
- C** Horizonte mineral poco afectado por procesos edafogénicos, sin propiedades de A, menos estructurado que el horizonte B, y que presenta las propiedades del material original en más del 50 % en volumen; o cambio brusco de material en el caso de suelos aluviales o coluviales.
- Y** Se aplica cuando se tiene acumulación generalizada de yeso y esté sin cementar, o que se describe como yeso vermiforme. También se aplica cuando por análisis químico el yeso es mayor al 25 % y coincide con predominio del yeso en más del 50 % de la lámina delgada. Escasa presencia de yeso xenomórfico en fisuras o vesículas. Con microestructura masiva, laminar o vesicular. Los horizontes By, Cy se nombran como Y.

Para designar a un horizonte como Y se usa criterio de campo y además coincide con las secciones delgadas, en cambio en algunos casos no hay concordancia con el análisis químico el cual se considera que falló. Lo anterior se constata, por ejemplo para el tercer horizonte del pedión P3 el cual por análisis químico tiene 25.5 % de yeso, y por sección delgada es 48 % g/f de 20  $\mu\text{m}$  además el material fino es de naturaleza yesosa y tiene fábrica-b microgíptica. La subestimación posiblemente se debió a relación suelo:agua alta o por poco tiempo de reacción, en ambos casos permaneció yeso sin disolver. Al respecto Sayegh *et al.*, (1978) dicen que los métodos para determinar yeso normalmente para suelos ácidos o neutros dan resultados considerablemente erróneos cuando se usan en suelos con alto contenido de yeso. Porta (1998) dice que para determinar yeso por métodos químicos en húmedo se debe utilizar una relación suelo:solución baja, y según Sayegh *et al.* (1978) esta debe ser 1:500; además, agregan que es necesario usar suelo tamizado en malla de 270.

Varios autores Porta *et al.* (1977), Poch (1992b), Artieda (1996, 2004), y Artieda y Herrero (2004) designan como Y al horizonte que en campo se describe como acumulación generalizada de yeso y no está cementado; la acumulación es mayor

del 50 % en volumen (Herrero, 1991; Artieda, 1996, 2004; Artieda y Herrero, 2004) y es usado por Artieda (1996, 2004) independientemente de su posición en el perfil. Herrero (1991) al horizonte de acumulación de yeso y que cumple las exigencias para gípsico lo designa como Y, agrega que se corresponde con un By de FAO.

**Ym** Horizonte gypsico cementado, sin estructura o ésta es laminar, y que cumple el requisito para petrogypsico. No lo penetran las raíces. Un fragmento seco no se desbarata después de estar por 24 hr o más sumergido en agua. En secciones delgadas hay abundancia de fisuras o vesículas con yeso xenomórfico indentado. Se corresponde al Ym propuesto por Porta y Herrero (1988) y por Artieda (1996, 2004). Es equivalente al R o RC.

#### **Subíndices utilizados.**

- b.** Se usa para indicar que se trata de un horizonte enterrado.
- c.** Se usa para indicar la existencia de nódulos de carbonato identificados en campo o en láminas delgadas.
- k** Se usa para indicar acumulación de carbonatos secundarios, tales como nódulos, identificados en campo o en secciones delgadas. También cuando la diferencia de  $\text{CaCO}_3$  equivalente es mayor al 5 % respecto al horizonte superior.
- m** Se usa en horizontes cementados o extremadamente duros en seco.
- n** Se usa en horizontes con porcentaje de sodio intercambiable mayor al 15 %.
- p** Se usa en horizonte superficial con evidencias de labranza.
- w** Se usa en horizonte B con desarrollo de estructura edáfica.
- y** Se usa en horizontes con contenido de yeso total mayor o igual al 1 %, o con presencia de yeso nodular o vermiforme. No es necesario que cumpla las exigencias para gypsico. Poch (1992a) utiliza el subíndice “y” incluso en A para indicar acumulaciones secundarias de yeso, generalmente vermiforme en matriz silicática-carbonática. Herrero *et al.* (1993) y Artieda (1996, 2004) emplean, incluso en A, para indicar acumulaciones de yeso mayores al 1 % en volumen.
- z** Se usa para indicar acumulación de sales más solubles que el yeso, a partir de una  $\text{CE}_{\text{es}}$  mayor o igual a 8 dS/m a 25 °C, (en el apartado se dan las razones de ello).

En Soil Survey Staff (2003) se usa el subíndice “z” para el cual solamente se dice que indica acumulación de sales más solubles que el yeso, sin especificar, por ejemplo, el valor de CE a tomar en cuenta. En Soil Survey Staff (1999) no incluye definición de sufijos. Sin embargo Shoeneberger *et al.* (2002) dicen que “z” se usa para indicar acumulación edafogénica de sales más solubles que el yeso. Los autores Herrero *et al.* (1993) y Artieda (1996, 2004) consideran como umbral un valor de  $CE_{es}$  de 16 dS/m a 25 °C, y lo utilizan también en el horizonte A.

En el presente trabajo se prefirió usar como valor crítico una  $CE_{es}$  de 8 dS/m a 25 °C, a partir de este valor corresponde a salinidad moderada (Soil Survey Division Staff, 1993). El umbral considerado se fundamenta en que en suelos con dicho nivel de sales, algunos cultivos que actualmente se siembran en la región son afectados en su desarrollo. Por ejemplo la  $CE_{es}$  umbral, dS/m a 25 °C, del jitomate (tomate) es 2.5, del chile y del maíz 1.7, y del frijol 1.0 (Hillel, 2000); además, puede haber 50 % de reducción en la emergencia en el jitomate, maíz y frijol con  $CE_{es}$  de 7.6, 21, y 8 dS/m, respectivamente (Ayers y Westcot, 1985); o una disminución del 50 % del rendimiento en jitomate, maíz, pimiento y frijol con  $CE_{es}$  de 7.6, 5.9, 5.1 y 3.6 dS/m a 25 °C, respectivamente (Porta *et al.*, 2003).

#### **4.5.2. Denominación de horizontes diagnóstico.**

**Horizonte gypsic.** Es el horizonte que reúne los requisitos de tener 15 cm o más de espesor, mínimo un 5 % de yeso y el producto de su espesor, en cm, por el porcentaje de yeso es igual o superior a 150. La condición iluvial de Soil Survey Staff (1999) es obviada y en campo se considera como yeso edáfico al que aparece como nódulos friables, vermiforme, yeso lenticular y yeso farináceo (Artieda, 1996, 2004). En el actual trabajo además se corresponde al horizonte Y, por lo general presenta actividad de raíces. Su pedialidad va de fuertemente desarrollada a débil, micromorfología variable, presenta organización en islas dominante, revestimientos, nódulos rellenos de yeso. En campo se corresponde con yeso vermiforme.

**Horizonte hipergypsic.** Se describe en los términos definidos por el ICOMID (Eswaran y Zi-Tong, 1991), en el cual el contenido de yeso debe ser mayor o igual a 60 %; con espesor de 15 cm o más; con cementación débil, de modo que un fragmento seco se deshaga en agua, o presente fracturas por las que puedan penetrar las raíces, distanciadas menos de 10 cm. En Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999) no se

propone el uso del término hipergypsico, sin embargo por considerarse de interés práctico se utiliza a nivel de familia. En la clasificación según WRB (1999) se utiliza a nivel de unidad inferior de suelo. En el presente trabajo además se considera como hipergypsico cuando presenta escasa actividad de raíces, casi siempre se corresponde con el yeso farináceo. Su pedialidad está poco desarrollada o es apedral, micromorfología masiva, laminar generalmente con vesículas, organización en islas no dominante. Se corresponde con el horizonte Y más no con Ym.

**Horizonte petrogypsico.** Debe estar cementado o endurecido a tal grado que las raíces solamente pueden penetrar a lo largo de fracturas verticales con espaciamiento horizontal de 10 cm o más; los fragmentos secos no se disgregan después de estar por 24 hr en agua; el espesor debe ser de 10 cm o más; con al menos 5 % de yeso, y el producto de su espesor, en cm, por el porcentaje de yeso debe ser 150 o mayor (Soil Survey Staff, 1999).

**Horizonte cálcico.** Horizonte mayor o igual a 15 cm de espesor, no endurecido, con  $\text{CaCO}_3$  equivalente  $\geq 15$  %, y su  $\text{CaCO}_3$  equivalente al menos 5 % mayor al del horizonte subyacente; o con 5 % o más de carbonato secundario identificable a menos que la clase de tamaño de partículas sea arenosa, esqueletal arenosa, franco grueso, o franco esqueletal, y el contenido de arcilla menor al 18 %.

**Horizonte hipercálcico.** Contenido de carbonato de calcio equivalente de 50 % o más y 15 cm o más de espesor (WRB, 1999). Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999) no propone el uso del término hipercálcico, sin embargo por considerarse de interés práctico se utiliza a nivel de familia.

**4.6. Micromorfología.** En cada muestra inalterada se fabricaron cortes delgados para describir la micromorfología y mineralogía de los suelos estudiados. Para elaborar las 41 secciones delgadas (Tabla IV.2) primero se secó la muestra al aire y posteriormente se impregnó con resina poliéster y monómero de estireno en una relación 7:3. Una vez secas se cortaron utilizando aceite como líquido refrigerante, subsiguientemente se desbastaron manualmente hasta un grosor aproximado de 30  $\mu\text{m}$ ; y se montaron en un portaobjetos. La descripción de las secciones delgadas se hizo conforme a Bullock *et al.* (1985) y Stoops (2003), así como a la terminología generada por Herrero (1991), Herrero *et al.*, (1992) sobre suelos yesosos. Se utilizó un microscopio polarizante Carl Zeiss – Jenapol con cámara fotográfica integrada.

**Nódulos.** Los nódulos se describen según Bullock *et al.* (1985) y Stoops (2003). Los nódulos con fábrica interna concéntrica se corresponden con las concreciones de Brewer (1976).

**Tamaño del yeso lenticular.** Las medidas que se dan del yeso lenticular corresponden a la parte más ancha, es decir al eje transversal de la sección.

**Grueso – fino.** Para la separación entre material grueso y material fino se tomó como umbral 20  $\mu\text{m}$ . Los porcentajes respectivos se refieren considerando como 100 % al total de material grueso y fino, sin incluir el porcentaje de huecos.

**Tamaño de carbonatos de calcio o granos de calcita.** Micrita < 5  $\mu\text{m}$ , microesparita 5-15  $\mu\text{m}$  y esparita > 15  $\mu\text{m}$  (Hay y Wiggins, 1980).

**Excrementos.** La descripción de los excrementos y la posible correspondencia con mesofauna se hace según Bullock *et al.* (1985).

Tabla IV.1. Láminas delgadas descritas y profundidad de muestreo. Se indica la forma en que serán nombrados en lo sucesivo.

Perfil	Latitud N	Longitud O	Altitud m	Láminas delgadas y ubicación, cm
P1	21° 57.364'	099° 56.563'	0998	5-15, 35-45, 55-65, 100-110
P2	22° 19.550'	100° 04.133'	1046	0-10, 30-40
P3	22° 17.450'	100° 03.300'	1044	0-10, 5-15, 30-35
P4	22° 09.913'	100° 14.606'	1240	0-10, 10-20, 20-30
P5	22° 11.764'	100° 11.319'	1110	0-10, 20-30, 50-80, 80-90, 95-105
P6	22° 14.319'	100° 10.753'	1098	0-8, 24-34, 50-60
P7	22° 16.799'	100° 10.591'	1096	0-10
P8	22° 17.212'	100° 12.116'	1096	0-10, 15-25
P9	22° 41.900'	099° 54.100'	1022	0-10
P10	22° 37.883'	099° 50.150'	1015	0-10, 25-35, 40-50, 95-105
P11	24° 07.800'	100° 55.473'	1715	0-10, 10-20, 30-35, 55-60
P12	24° 14.145'	100° 52.167'	1720	0-5, 30-40
P13	24° 14.242'	100° 52.103'	1715	0-10, 20-30, 60-65, 80-85
P14	23° 52.183'	100° 57.240'	1737	0-5, 5-15, 20-25
P15	22° 14.400'	100° 08.100'	1092	Sin láminas delgadas
P16	24° 12.500'	100° 54.570'	1710	Sin láminas delgadas

**4.7. Mineralogía.** Se realizó por análisis de Difracción de Rayos X (DR-X) en polvo no orientado en el Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X-LUGIS, Departamento de Geoquímica-UNAM, México. Para interpretar mejor las proporciones de los minerales en las muestras, se realizaron pruebas químicas para la determinación de carbonatos. La montmorillonita, nontronita y sepiolita se identificaron tratando la muestra con etilenglicol. Los difractogramas se obtuvieron en los polvos directamente, con un difractómetro Philips con registro en papel y la identificación se hizo "a mano", es decir sin recurrir a programas de búsqueda automática.

## **5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

Los perfiles de suelos descritos se agruparon de acuerdo con su posición en el paisaje (Figura IV.4). Se reconocen tres posiciones geomorfológicas, las dos últimas subdivididas de acuerdo a la presentación del suelo: 1) Ladera, 2) Microrrelieve ondulado dividido en a) en posición somital; b) en posición valle ciego; y c) en posición “Joya”, parte baja de zona posiblemente cárstica y con características flúvicas, y 3) Planicie dividida en cuatro a) con horizonte yesoso somero, b) con horizonte yesoso somero fase salina, d) con horizonte yesoso somero fase salino-sódica, y d) con horizonte yesoso profundo.

Cuando se tiene más de un perfil por grupo se analiza principalmente el que se considera representativo y se resaltan los aspectos relevantes de los demás. En cada uno de los suelos se incluyen cuatro aspectos o apartados: a) Clasificación y descripción del sitio, b) Descripción macromorfológica, c) Descripción micromorfológica, y d) Interpretación de la micromorfolología y mineralogía, la cual se hace al final de cada grupo de suelo.

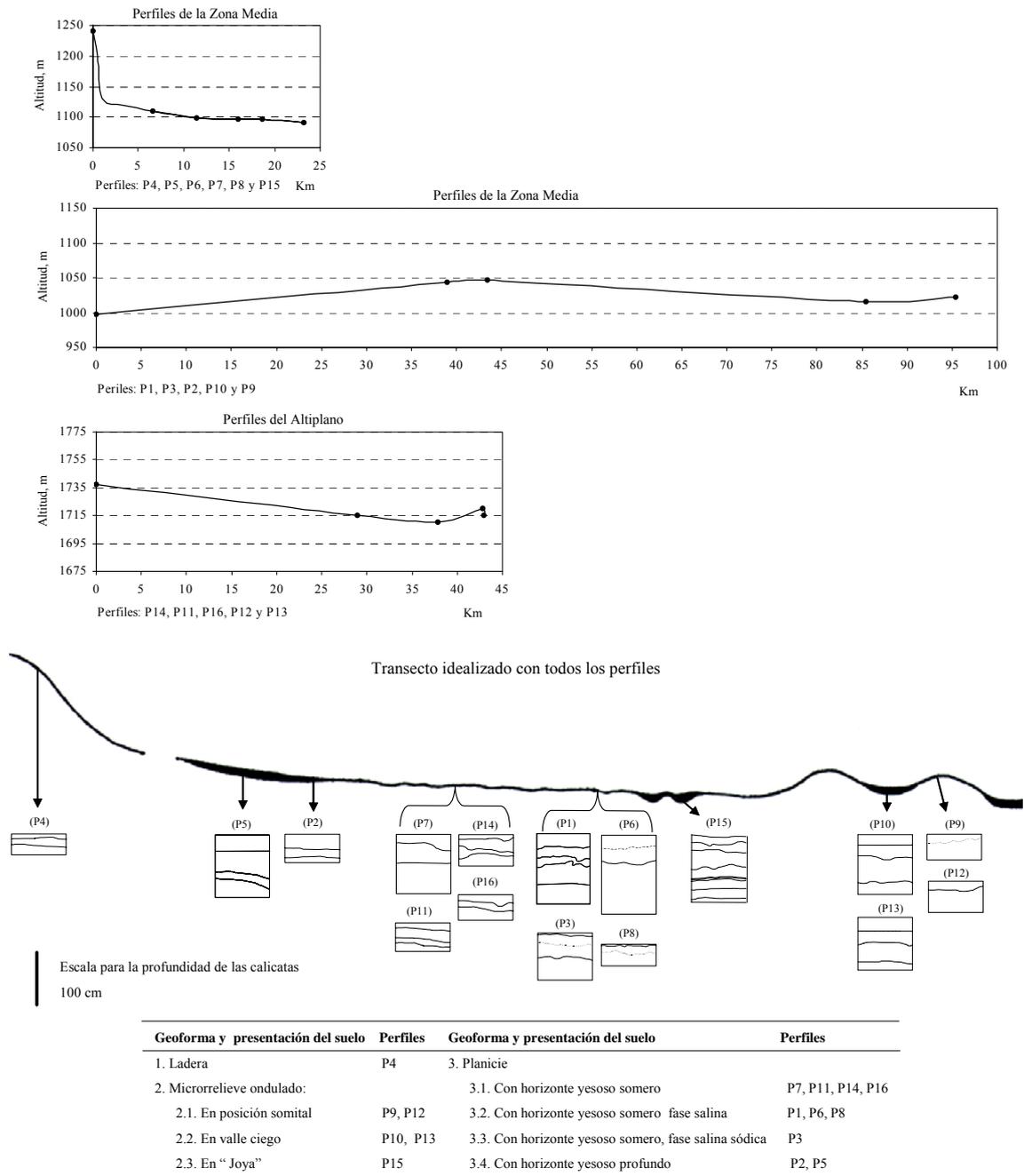


Figura IV.4. Ubicación de las calicatas de acuerdo a la altitud y distancia entre ellos, y transecto idealizado según posición en el paisaje.

### 5.1. Suelos de ladera.

En esta geoforma se tiene el pedión P4, ubicado a unos 250 m al noroeste de la población Agua de Enmedio, municipio de Villa Juárez, San Luis Potosí. Se localiza en la ladera del cerro el Carrizal, sobre la Formación Guaxcamá.

#### P4.A. Clasificación y características del sitio.

SSS, 1999: Petrogypsis típico, franco, gypico, térmico, superficial.

WRB, 1999: Gipsisol epipétrico, hipergípico.

Uso: Agostadero (apacentamiento) y obtención de “cuartón” para la construcción de casas habitación.

Relieve: Ladera regular, pendiente del 20 %.

Flora: Guapilla (*Hechtia glomerata* Zucc), Helecho “nido de gallina” (*Selaginella pilifera* A. Braun), Huizache (*Acacia sp.*).

Erosión: Es fuerte, en gran parte se perdió el horizonte superficial y solamente se conserva en las áreas protegidas por la vegetación. Se presenta en cárcavas.



Figuras IV.5 y IV.6. Sitio y perfil P4. La fotografía del perfil muestra el desarrollo horizontal de raíces, sin penetrar en el petrogypico.

#### P4.B. Descripción macromorfológica.

A. Profundidad 0 – 20/23 cm. Seco. Color en seco 10YR 8/2 y en húmedo 10YR 6/3.

Franco arenoso. Consistencia en seco ligeramente duro a duro y en saturado ligeramente plástico y adherente. Estructura laminar con tendencia a bloques subangulares débiles de unos 4 cm. Raíces medias comunes y finas pocas. Poros en canales originados por las raíces. Sin reacción al HCl al 10 % ni al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Permeable. Buen drenaje. Pedregoso en superficie, con piedras de hasta 15 cm de

tamaño. No se observan indicios de actividad de fauna. Transición marcada y ligeramente ondulada.

Ym. Profundidad 20/23 – 40 cm. Seco. Color en seco 10YR 8/1 y en húmedo 10YR 7/3. No se pudo determinar la textura al tacto por dureza. Extremadamente duro en seco. Estructura laminar. Sin raíces. Reacción violenta al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Impermeable. No se muestreó para análisis fisicoquímicos.

Tabla IV.2. Resultados de los análisis físicos, químicos y mineralógicos del Pedión P4.

Profundidad cm	Horizonte	Tamaño de partículas, %			pH H <sub>2</sub> O	MO %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/kg suelo	CEes dS/m 25 °C	Cationes solubles mmol/l extracto				RAS
		Ar	L	Ac					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
					1:2.5								
0-20	A				7.7	0.86	<1	2.22	17.8	2.1	1.58	6.14	1.9

Profundidad cm	Horizonte	CaCO <sub>3</sub> Total %	Yeso %	CIC cmol/kg suelo	Cationes intercambiables, cmol/kg suelo				PSI	Da g/cc
					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>		
0-20	A	1.0	54.3	18.0	17.45	0.41	0.03	0.11	0.6	1.02

Mineralogía, en orden decreciente de concentración relativa, DR-X		
0-20	A	Yeso
20-40	Ym	Yeso, cuarzo, calcita

#### P4.C. Descripción micromorfológica

**P4.C.1. Microestructura.** En el primer horizonte la pedialidad va de débil a moderada. Tiene dos tipos de microestructura dependiendo de si corresponde o no a la zona con mayor actividad de raíces. En las áreas con mayor influencia de la vegetación, es masiva con algunos bloques subangulares sin acomodar. Conforme se aleja de la zona radicular la estructura es masiva-laminar con vesículas. El segundo horizonte es apedral, masivo con vesículas.

**P4.C.2. Huecos.** En el área con más actividad de raíces la porosidad es del 30 % y predominan los canales (20 %, ≤ 2 mm); el 5 % son cámaras (0.5-4 mm); las fisuras (≤ 2 mm) conforman un 3 % de los huecos; las cavidades constituyen un 2 % (0.08-0.6 mm); todos los huecos tienen paredes lisas a ligeramente rugosas.

En las áreas con estructura masiva-laminar la porosidad es mayor (40 %) y predominan las fisuras horizontales (20 %, 0.01 – 1.0 mm), las vesículas representan el 10 % (0.2-0.5 mm) con paredes serradas; canales sin raíz (5 %, 0.5-1.0 mm) y canales con raíz (5 %, 0.1-0.2 mm). Las paredes de los huecos son serradas a rugosas debido al yeso, algunos canales tienen paredes lisas.

En el segundo horizonte la porosidad disminuye hasta un 20 %, está conformada principalmente por vesículas (15 %, 0.1-1.5 mm), canales (4 %, 0.5-4.0 mm) y fisuras (1 %,  $\leq 65 \mu\text{m}$ ), los poros son de paredes serradas o lisas, no existen poros de raíz. La microestructura es masiva con vesículas.

**P4.C.3. Componentes orgánicos.** En el primer horizonte, área con mayor actividad radicular, corresponden principalmente a raíces activas (7 %) a muy flobafenizadas, de diferentes tamaños, comúnmente en un mismo hueco (Figuras IV.7 y IV.8), el tamaño varía de 0.35 a 0.8 mm, son raros los restos de raíces muy flobafenizadas donde se aprecian los pelos radiculares (Figuras IV.9 a IV.11). En la parte laminar las raíces disminuyen a un 3 %. En el segundo horizonte ya no existen raíces.

#### **P4.C.4. Masa basal**

**P4.C.4.1. Material grueso.** En la parte más alterada o con mayor influencia de actividad de raíces del primer horizonte la relación grueso/fino es de 1.5/8.5. La calcita citomorfa representa el 4.5 % y el tamaño es de 60-100  $\mu\text{m}$ ; la calcita no citomorfa constituye el 3 % tamaño de 30  $\mu\text{m}$ ; el yeso lenticular idiomórfico e hipidiomórfico representa el 6 % y su tamaño va de 20 a 50  $\mu\text{m}$ ; el 1.5 % es cuarzo de 30  $\mu\text{m}$  tamaño. La distribución relativa grueso/fino es porfírica abierta. En la parte del suelo con estructura laminar la relación grueso/fino es de 3.5/6.5 y el principal mineral es el yeso (33 %, tamaño de 20 a 50  $\mu\text{m}$ ) lenticular idiotópico, hipidiotópico y xenomórfico o indentado en huecos, con disposición radial o en empalizada; también se tienen granos aislados ( $< 2 \%$ ) de cuarzo (30  $\mu\text{m}$ ). La distribución relativa grueso/fino es porfírica abierta.

En el segundo horizonte la relación grueso/fino es 3.5/6.5. Nuevamente predomina el yeso con un 25 % y tamaño  $\leq 80 \mu\text{m}$ , es xenomórfico o hipidiomórfico y se le encuentra

principalmente como revestimiento radial o paralelo en huecos, o en nódulos y como relleno. El 8 % corresponde a calcita, es frecuente la citomorfa, birrefringente, iridiscente y tamaño de 40-80  $\mu\text{m}$  (Figuras IV.12 y IV.13), sin disgregar o elementos aislados. El cuarzo constituye cerca del 2 %, tamaño de 30 a 40  $\mu\text{m}$ , límpido. La distribución relativa grueso/fino es porfirica abierta.

**P4.C.4.2. Material fino.** En la parte con mayor actividad de la biota es amarillo en LPP con diafragma cerrado, y gris en LPC, correspondiendo a yeso microcristalino. Fábrica-b estriada moteada y poroestriada. En la parte laminar es amarillenta moteada con fábrica-b de yeso microcristalino o microgíptica con micrita y también poro estriada (Figuras IV.14 a IV.16). El segundo horizonte tiene material fino de color pardo en LPP y grisáceo en LPC, la fábrica-b es de yeso microcristalino con micrita.

#### **P4.C.5. Edaforrasgos.**

**P4.C.5.1. Revestimientos.** En la cercanía de las plantas hay revestimientos típicos de materia orgánica, y revestimientos típicos sobre las raíces. En la parte laminar son comunes los revestimientos típicos de yeso lenticular xenomórfico o hipidiomórfico en casi todos los huecos, dispuesto en forma radial o en empalizada; son frecuentes los hiporrevestimiento en huecos, con frecuencia rellenos de agregados esferoidales, de yeso microcristalino y en algunos casos se aprecia ligera orientación paralela al hueco; también son frecuentes los revestimientos típicos de materia orgánica; los hiporrevestimientos de calcita micrítica también son frecuentes.

En el segundo horizonte son comunes los revestimientos típicos de yeso lenticular xenomórfico e hipidiomórfico en huecos, en forma radial o en empalizada; son frecuentes los revestimientos típicos pardo muy oscuro son posiblemente de manganeso o de materia orgánica muy flobafenizada (Figuras IV.14 a IV.16); revestimientos típicos de yeso microcristalino. También se presentan frecuentes hiporrevestimientos de limo carbonático en huecos.

**P4.C.5.2. Rellenos.** En la parte más alterada por la biota (raíces y mesofauna) predominan los rellenos densos completos o incompleto de agregados esferoidales o mamilados organo-mineral, o con composición similar al de la masa basal, relacionados

a la actividad de la mesofauna; son escasos rellenos importantes ( $\leq 1.0$  mm) son denso completo o incompleto de yeso lenticular xenomórfico o hipidiomórfico.

En el área masiva-laminar son frecuentes los rellenos densos incompletos de yeso lenticular xenomórfico o hipidiomórfico, pocos son de yeso microcristalino, en fisuras; se presentan raros rellenos tipo denso incompleto de limo carbonato; son raros los rellenos ( $\leq 3$  mm) denso completo o incompleto debidos a la actividad de los microorganismos.

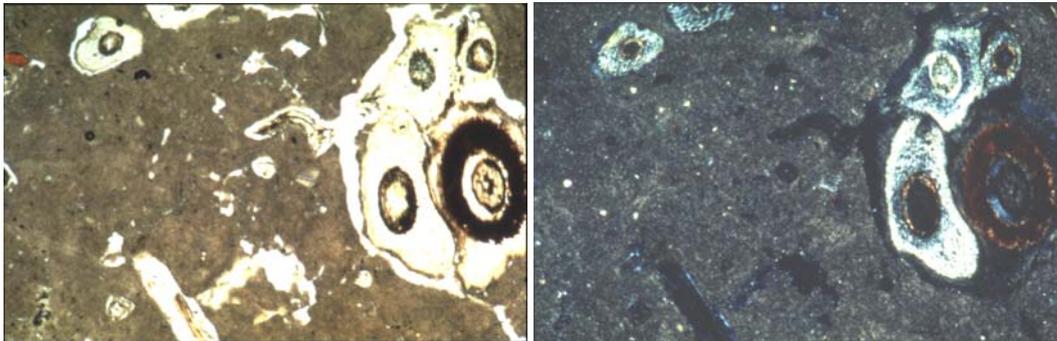
En el segundo horizonte son frecuentes los rellenos densos incompletos o completos de yeso microcristalino o lenticular hipidiomórfico o idiomórfico; algunos rellenos son denso incompleto de calcita microesparita o micrita, junto con yeso pero sin mezclarse (Figuras IV.17 y IV.18).

**P4.C.5.3. Nódulos.** En el área con más actividad de la biota hay nódulos típicos redondeados, de color pardo-amarillento, orgánico-mineral, tamaño 0.4-0.9 mm con fábrica interna cristalítica. Son frecuentes los nódulos órticos típicos, tamaño de 150  $\mu\text{m}$ , birrefringentes, formados por yeso lenticular o microcristalino con micelios. En la parte laminar son raros los nódulos típicos (0.5 mm) órgano minerales (con yeso lenticular hipidiomórfico) y corresponden a actividad de mesofauna, en algunos casos poco conservados. También son raros los nódulos típicos órticos de yeso lenticular hipidiomórfico o xenomórfico y muy raros los de yeso microcristalino. Son frecuentes los nódulos débiles a fuertemente impregnativos de materia orgánica, algunos quizá sean de manganeso.

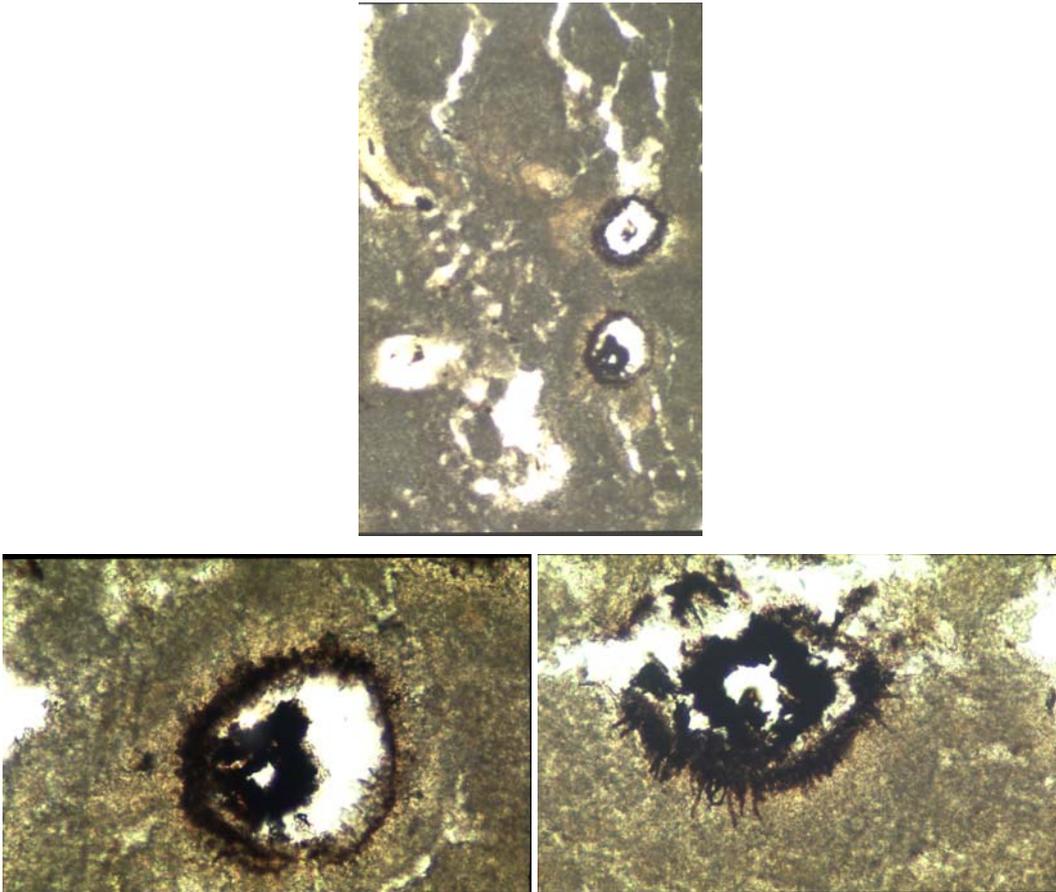
En el segundo horizonte son frecuentes los nódulos órticos típicos de yeso microcristalino con tamaños que varía de 0.05 a 0.5 mm. Son raros los nódulos típicos micríticos con tamaño de limo. También son muy raros los nódulos órticos típicos microesparíticos de tamaño grava fina. Son raros los nódulos órticos típicos tamaño arena gruesa y con tamaño de los cristales de calcita de limo a arena muy fina (Figuras IV.9 y IV.10).

**P4.C.6. Excrementos.** En la parte con mayor actividad de la biota, la actividad de los microorganismos es alta, son comunes los excrementos esféricos y esferoidales subredondeados, de tamaño, parcialmente alterados o sin alterar posiblemente de larvas de *Adelidae* y/o *Bibionidae* (Bullock *et al.*, 1985); También son frecuentes los mamilados con tamaño de arena media y composición similar a la masa basal, estos corresponden a *Lumbricidae* alterados; Otros muy frecuentes corresponden a oribátidos (Figuras IV.19 y IV.20).

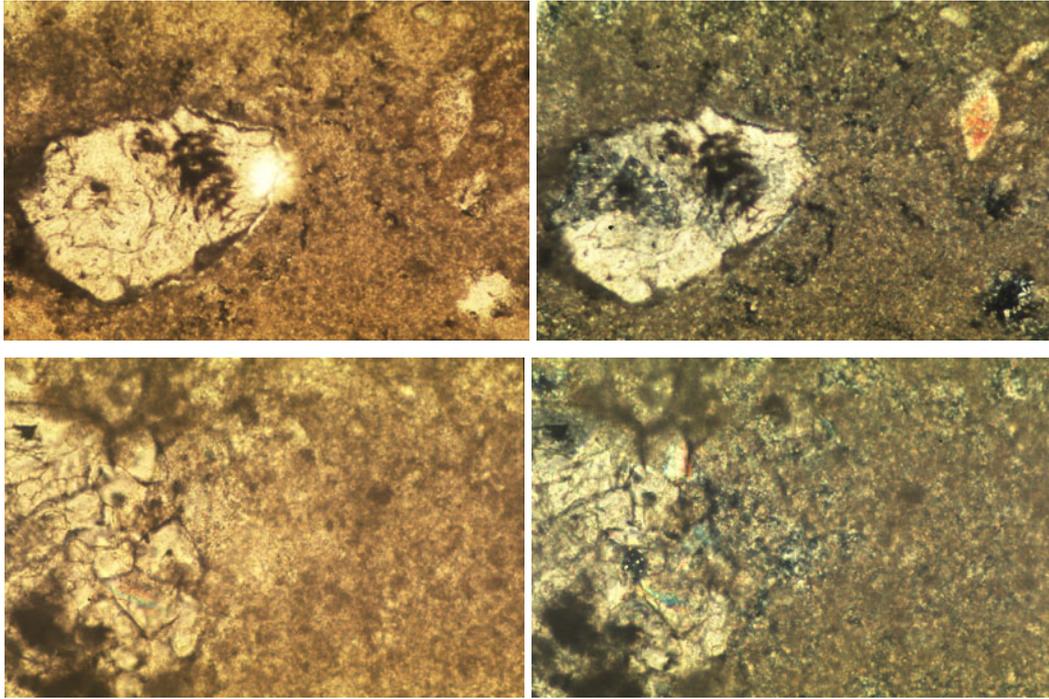
En la parte laminar la actividad de la mesofauna es menor. Las deyecciones más frecuentes son esféricas de tamaño de 100 a 500  $\mu\text{m}$ , y posiblemente corresponden a *Adelidae* y/o *Bibionidae* (Bullock *et al.*, 1985); otros escasos son ovalados muy alterados, coalescentes, flobafenizados, de ácaros oribátidos; son frecuentes los mamilados correspondientes a lombrices. En el último horizonte solamente existen excrementos mamilados coalescentes y de composición muy similar a la masa basal, por lo que corresponde a edaforrasgo de fábrica, pertenecen a *Lumbricidae*.



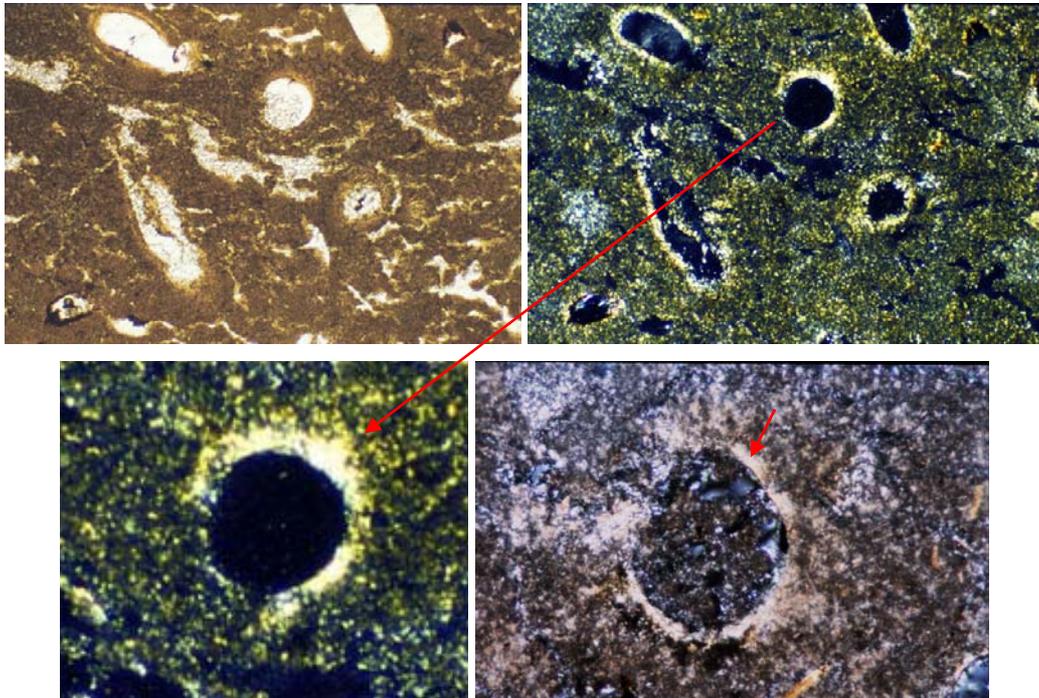
Figuras IV.7, LPP y IV.8, LPC. Se aprecia alta actividad de las plantas, presentándose varias generaciones de raíces en un solo hueco, o que cuando hay un hueco lo aprovechan, de cualquier forma evidencia la importancia de la biota en la formación del suelo. Masa basal gípsica microcristalina, corresponde a yeso farináceo. Componente orgánico anhisto rojo en la esquina superior izquierda. Lado mayor 3.4 mm.



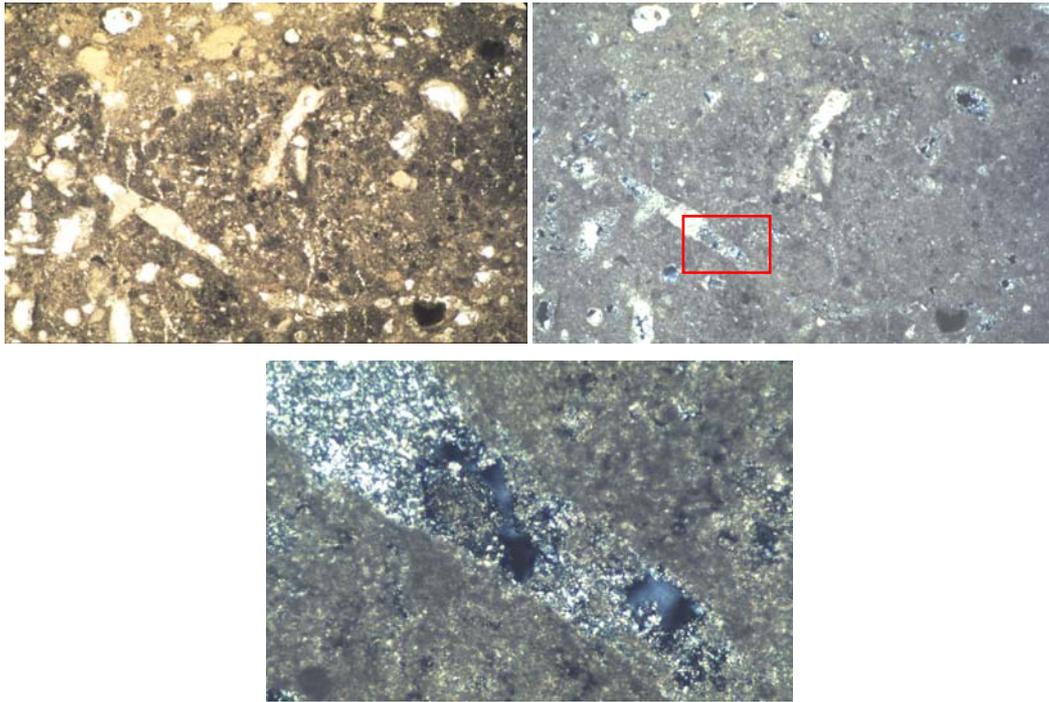
Figuras IV.9 a IV.11, LPP. Restos de materia orgánica, posiblemente raíces, y pelos radicales-hifas muy flobafenizados, con posible mezcla de óxido de manganeso. Fábrica-b cristalítica de yeso microcristalino. Lado menor de la primera Figura 1.43 mm y de las otras dos 0.46 mm.



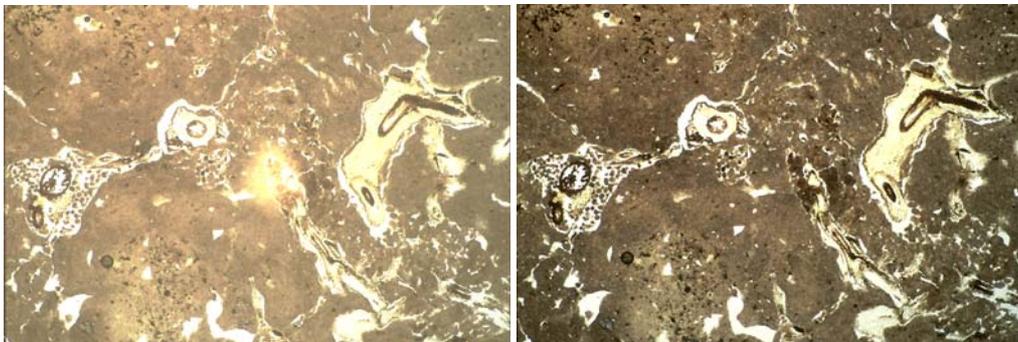
Figuras IV.9, LPP y IV.10, LPC. Calcita y granos de yeso (no se detectó dolomita por DR-X). El material fino es de micrita y de yeso microcristalino. Lado mayor del primer par de Figuras 6.8 mm (LPP y LPC), y del segundo 0.55 mm.



Figuras IV.11, LPP a IV.13, LPC. Masa basal de yeso microcristalino y micrita. Revestimientos de yeso xenomórfico, materia orgánica y posiblemente de manganeso. En el acercamiento, Fábrica-b poroestriada. Cámara con rellenos esferoidales y Fábrica-b poroestriada. P4:10-20 cm. Lado mayor 3.42 y 1.09 mm.



Figuras IV.17, LPP y IV.18, LPC. Relleno denso incompleto de yeso microcristalino con micrita, Porta (1986) reporta granos de esparita en una masa de cristales de yeso lenticular. Lado mayor 6.8 mm y 1.09 mm.



Figuras IV.19, LPP y IV.20, LPC. Material fino constituido por yeso microcristalino, con mucha actividad de la biota. Se aprecia actividad conjunta de las raíces, de oribátidos y de lombrices. Lado mayor 6.8 mm.

#### **P4.D. Interpretación.**

En este perfil destaca la importancia de los factores bióticos como agentes formadores del suelo, en especial la vegetación, cuyas raíces penetran en el horizonte Ym a través de grietas, fracturándolo y fragmentándolo, e incorporando materia orgánica y acelerando el desarrollo del suelo. Se aprecian hasta dos o tres generaciones de raíces en un mismo hueco (Figuras IV.7, IV.8, IV.19 y IV.20). En estas Figuras también se ve gran actividad de mesofauna del suelo, tales como lombrices y oribátidos.

Las lombrices al ingerir el suelo junto con residuo vegetal, además de desintegrar la materia orgánica, mezclan y trituran los materiales del suelo induciendo cambios en la estructura, la textura, la densidad aparente, nivel de nutrientes, la permeabilidad y la aireación (Wild, 1992; Jackson *et al.*, 2003; Porta *et al.*, 2003). Por otra parte, los oribátidos descomponen la materia orgánica.

La vegetación es un agente formador del suelo muy importante e interviene: formando grietas o incrementando las ya existentes por acción mecánica y química de la raíz; altera los minerales; regula el clima y la erosión; y la materia orgánica aportada propicia la acción de los microorganismos (Ford, 1984). En el Pedión P4 la importancia de la vegetación se aprecia en el mayor desarrollo del suelo en su presencia, y en la retención del suelo por las raíces. Así, en las áreas donde se eliminó la vegetación y dada la fuerte pendiente y facilidad de erosión del suelo con predominio de yeso microcristalino (Herrero, 1991; Navas y Machín, 1997; Machín y Navas, 1998), el horizonte superficial se ha perdido, y el material suelo que se está generando se sigue perdiendo. La pérdida de suelo se ve acelerada por el carácter torrencial de las lluvias. Navas y Machín (1997) para una región yesosa de la región del valle del Ebro, España, estiman que los Gipsisoles, que representan el 15 % de los suelos, aportan el 33 % de las 80 t/ha de sedimentos producidos durante una lluvia de 15 minutos con intensidad de 48 mm/hr. Por tales razones estos suelos no son aptos para la agricultura y se deben mantener con la vegetación natural o dedicarse a la ganadería extensiva de manera sustentable.

Respecto a los componentes gruesos, en el horizonte superficial se detectó yeso, calcita y cuarzo al microscopio, en cambio por DR-X solamente yeso (Tabla IV.2). En el segundo horizonte Ym hay coincidencia entre la mineralogía identificada en las secciones delgadas y el análisis de DR-X, correspondiendo a yeso, cuarzo y calcita.

Como ya se dijo este perfil se ubica en la Formación Guaxcamá constituida por una secuencia de yesos y anhidritas entre las que se intercalan horizontes de dolomitas (CRM, 1990; CRM, 2000a, 2000b). Mediante micromorfología y análisis semicuantitativo de DR-X no se detectó anhidrita ni dolomita, y en el pedión predomina el yeso.

La no presencia de la dolomita puede ser debida a que el perfil se ubica sobre yesos con materiales carbonáticos en el horizonte endurecido. Nuestros resultados concuerdan con el Consejo de Recursos Minerales (1990) respecto a que el yeso predomina en la superficie debido al intemperismo de la anhidrita, esta se hidrata al entrar en contacto con el agua de lluvia (Quirantes, 1978) transformándose en yeso. La calcita encontrada puede provenir de la dolomita la cual con el agua de lluvia pierde el magnesio y se transforma en calcita Mench (1986), también se puede tratar de calcita citomorfa dado el límite ondulado y ligera apariencia celular, tanto de la calcita en agregados (Figuras IV.9 y IV.10) como de granos aislados.

Por otro lado, varios autores (Adams *et al.*, 1997; MacKenzie y Adams, 1997; Perkins y Henke, 2002) concuerdan en que la calcita y la dolomita tienen propiedades ópticas muy similares, por ejemplo la dolomita en grano fino presenta colores de interferencia altos y cuando en un sedimento crecen cristales aislados de dolomita no es posible que mantenga su morfología romboédrica, ello dificulta su identificación en lámina delgada. Para asegurarse de si es dolomita o calcita hubiere sido necesario teñir la muestra o la sección delgada sin cubreobjetos en una solución de rojo de alizarina S en ácido clorhídrico diluido, tiñéndose de rojo la calcita. Un hecho que nos lleva a descartar la presencia de dolomita en este perfil es que el suelo reaccionó violentamente al HCl al 10 % lo cual es característico de la calcita, y como señalan MacKenzie y Adams (1997) la dolomita reacciona mucho más lento, salvo cuando se calienta el ácido.

**5.2. Suelos en áreas con microrrelieve ondulado.** Estas áreas tienen pequeñas elevaciones no mayores a 10 m y en ocasiones menores al metro. Se subdividió en tres según la presentación del suelo: en posición somital (P9 y P12), en valle ciego (P10 y P13), y en “joya” (P15). La parte baja está conformada por material aluvial en el caso de los Pediones P10 y P13, y flúvico en el Pedión P15. El último caso se presenta en áreas con influencia directa del río Choy, Zona Media, también hay materiales flúvicos en la parte alta o “loma” según lo observado en un pozo para agua cercano a la calicata P15. El carácter flúvico no se tiene en la parte somital de las áreas de los pediones P9 y P12.

El suelo de la parte alta o somital está poco desarrollado, en ocasiones tiene costra superficial de pocos milímetros, o incluso horizonte superficial con estructura prismática pudiendo alcanzar los 40 cm de profundidad y patrón de fracturas poligonales vistas desde arriba (Pedión P12), el yeso con mucho es el principal componente del suelo en esta posición. En la parte baja el horizonte gípsico puede estar subyaciendo a material fino con menos del 1 % de yeso, Pediones P10 y P13. El material aluvial puede alcanzar el metro de profundidad. En las áreas planas con características flúvicas, denominadas localmente “joyas”, los sedimentos acumulados son carbonatados y en algunos horizontes se acompaña de yeso.

**5.2.1. Suelos en posición somital.** En esta posición se tienen dos pediones P9 y P12. El primero se localiza al norte de la Zona Media, aproximadamente a 2 km al noroeste del poblado Puerto de San Juan de Dios, municipio de Ciudad del Maíz. El segundo se sitúa en el Altiplano a unos 7.5 km al norte de San Vicente, municipio de Vanegas.

#### **5.2.1.1. Perfil P9**

##### **P9.A. Clasificación y características del sitio.**

Soil Survey Staff, 1999: Petrogypsis típico, franco, gypsico, térmico, superficial.

WRB, 1999: Gipsisol epipétrico, hipergípsico.

Uso: Apacentamiento de ganado mayor y menor (Agostadero).

Relieve: Lomeríos suaves y alargados. La calicata se ubicada en la parte alta, somital.

Flora: Donde se describió el perfil hay tabaquillo loco, y zacate banderita *Bouteloua chasei*, y en la parte baja mezquite (*Prosopis laevigata*), huizache (*Acacia* sp.) y palma (*Yucca filífera*).

Erosión: Moderada en el sitio del perfil y severa en las cercanías.



Figuras IV.21 y IV.22. Sitio y perfil P9. En la primera se aprecia la escasa vegetación en la parte somital y el matorral desértico en las partes bajas.

### **P9.B. Descripción macromorfológica.**

A. Profundidad 0 – 15 cm. Seco. Color en seco 10YR 7.5/1 y en húmedo 10YR 6.5/2.

Franco arenoso. Ligeramente duro en seco y ligeramente plástico y no pegajoso en mojado o muy húmedo. Estructura bloques subangulares muy poco desarrollados con tamaño de 2 a 4 cm. Raíces medias abundantes donde existen plantas y en los primeros dos centímetros. Canales finos y medios comunes. Ligera reacción al HCl al 10 % fuera de la zona radicular y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Permeable y con buen drenaje. Sin piedras. Transición difusa o tenue y límite ligeramente ondulado.

Ym. Profundidad 15 – 45 cm. Seco. Color en seco 10YR 8/1.5 y en húmedo 10YR 7/2.

Franco con gravilla. Extremadamente duro en seco y ligeramente plástico y no pegajoso en mojado. Estructura masiva con tendencia laminar. Raíces medias y finas pocas. Poros finos pocos. Reacción fuerte al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Permeable y con buen drenaje. El material presenta granos de yeso que brillan al sol.

Tabla IV.3. Resultados de los análisis físicos, químicos y mineralógicos, Pedión P9.

Profundidad cm	Horizonte	Tamaño de partículas, %			pH H <sub>2</sub> O 1:2.5	MO %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/kg suelo	CEes dS/m 25 °C	Cationes solubles mmol/l extracto				RAS
		Ar	L	Ac					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
15-45	Ym				8.0	0.16	4.0	2.4	11.0	8.0	0.9	1.1	0.4

Profundidad cm	Horizonte	CaCO <sub>3</sub> Total %	Yeso %	CIC cmol <sub>c</sub> /kg suelo	Cationes intercambiables, cmol <sub>c</sub> /kg suelo				PSI	Da g/cc
					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>		
15-45	Ym	1.85	49.5	19.0	2.57	16.2	0.10	0.13	0.7	1.20

**Mineralogía, en orden decreciente de concentración relativa, DR-X**

0-15	A	Yeso
15-45	Ym	Yeso, cuarzo‡

‡ Mineral en muy baja proporción en relación al resto de los minerales.

### P9.C. Descripción micromorfológica

**P9.C.1. Microestructura.** El horizonte superficial tiene pedialidad muy débil. Tienen muy pocos agregados subangulares (5 %) en los primeros 2 centímetros y el resto de la lámina es masiva con tendencia laminar, con cámaras.

**P9.C.2. Huecos.** La porosidad es del 25 %. Predominan las cámaras (15 %) de 0.3 – 3.5 mm de tamaño, de paredes lisas, rugosas o serradas; le sigue en importancia las vesículas (5 %) de paredes rugosas a serradas y tamaño de 0.15 a 1.0 mm; el 3 % son canales de 0.18 a 0.45 mm de tamaño con paredes lisas; el 2 % son fisuras (90 – 400 µm) la mayoría horizontales, de paredes lisas a serradas. La pared serrada se debe a los revestimientos de yeso.

**P9.C.3. Componentes orgánicos.** Dominan las raíces activas de color amarillento en LPP, birrefringentes, sin flobafenizar y de fácil identificación (0.15 - 2.25 mm); otras están flobafenizadas y son de color pardo rojizo en LPP, birrefringentes, de fácil a difícilmente reconocibles. Son frecuentes los componentes orgánicos anhistos birrefringentes, redondeados a amorfos (30 - 100 µm) de color amarillo a rojizo en LPP, algunos con hifas (Figuras IV.23 y IV.24).

#### **P9.C.4. Masa basal**

**P9.C.4.1. Material grueso.** La relación grueso/fino es de 3.3/6.7. Los minerales presentes son de yeso lenticular idiotópico a hipidiotópico (25 %) de aproximadamente 40 – 60  $\mu\text{m}$ , con ondulaciones por los costados, fuertemente orientados a los huecos; yeso cola de golondrina (4 %, 110  $\mu\text{m}$ ); son raros los bioclastos carbonatados de forma semicircular y raramente se encuentran olivinos anhedrales (35  $\mu\text{m}$ ) con alto relieve; son escasos el cuarzo (<1 %, < 65  $\mu\text{m}$ ), la calcita (1%, < 65  $\mu\text{m}$ ) y la microesparita (<1 %, < 40  $\mu\text{m}$ ). También hay calcita citomorfa (2 %) de 30 a 80  $\mu\text{m}$ , (Figuras IV.23 y IV.24) en grupos o intercalada en la masa basal. Son frecuentes los fitolitos prismáticos asociados a las raíces (Figura IV.27 y IV.28). La distribución relativa grueso/fino es porfírica abierta.

**P9.C.4.2. Material fino.** Es de color amarillento en LPP y gris en nícoles cruzados, conformada por yeso, la fábrica-b es de yeso microcristalino, poro estriada o moteada (Figuras IV.29 y IV.30).

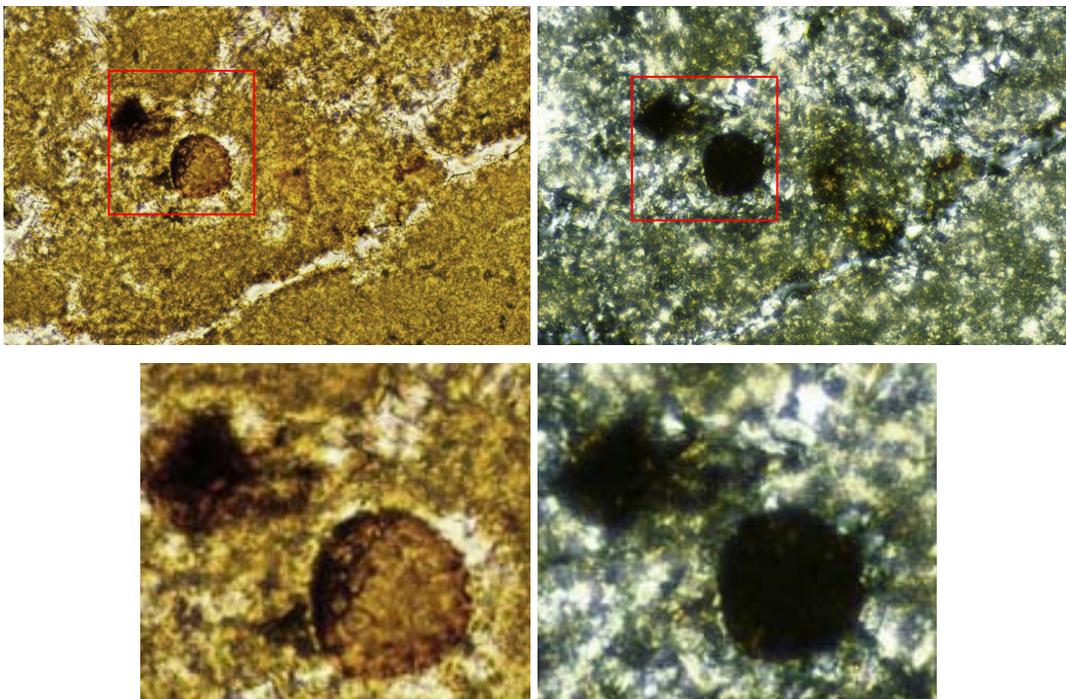
#### **P9.C.5. Edaforrasgos.**

**P9.C.5.1. Revestimientos.** Los revestimientos más abundantes corresponden a típicos de yeso indentado en vesículas; son frecuentes los típicos de yeso idiomórfico en cámaras y fisuras. Existen pocos revestimientos típicos de materia orgánica. Casi todas las raíces presentan masa basal a manera de revestimiento; en los que predomina el yeso lenticular (Figuras IV.27, IV.28, IV.31 y IV.32), y algunos granos alcanzan 60  $\mu\text{m}$  de diámetro.

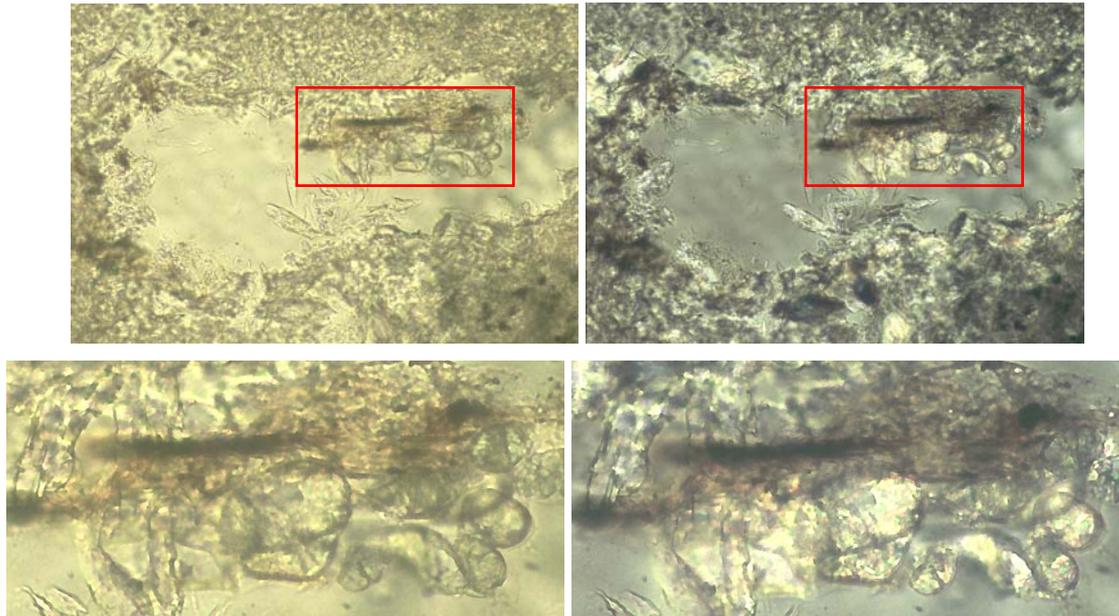
**P9.C.5.2. Rellenos.** Son abundantes los rellenos sueltos discontinuos o continuos en cámaras y canales con agregados esferoidales, de masa basal, de color pardo tenue en luz polarizada plana y gris en nícoles cruzados; o con agregados subredondeados de yeso lenticular subhedral. Vesículas frecuentes con relleno denso completo, incoloro en LPP y gris en LPC, constituido de yeso lenticular equigranular hipidiotópico o xenomórfico, con tamaño aproximado a 30  $\mu\text{m}$ .

**P9.C.5.3. Nódulos.** Los principales nódulos (2 mm) son órticos típicos de yeso lenticular equigranular (50  $\mu\text{m}$ ) o de yeso xenomorfo, con algunos granos de yeso lenticular más grandes (90  $\mu\text{m}$ ) con líneas de polvo horizontales al eje mayor (Figuras IV.31 y IV.32). Son raros los nódulos órticos de calcita citomorfa (Figuras IV.33 y IV.34).

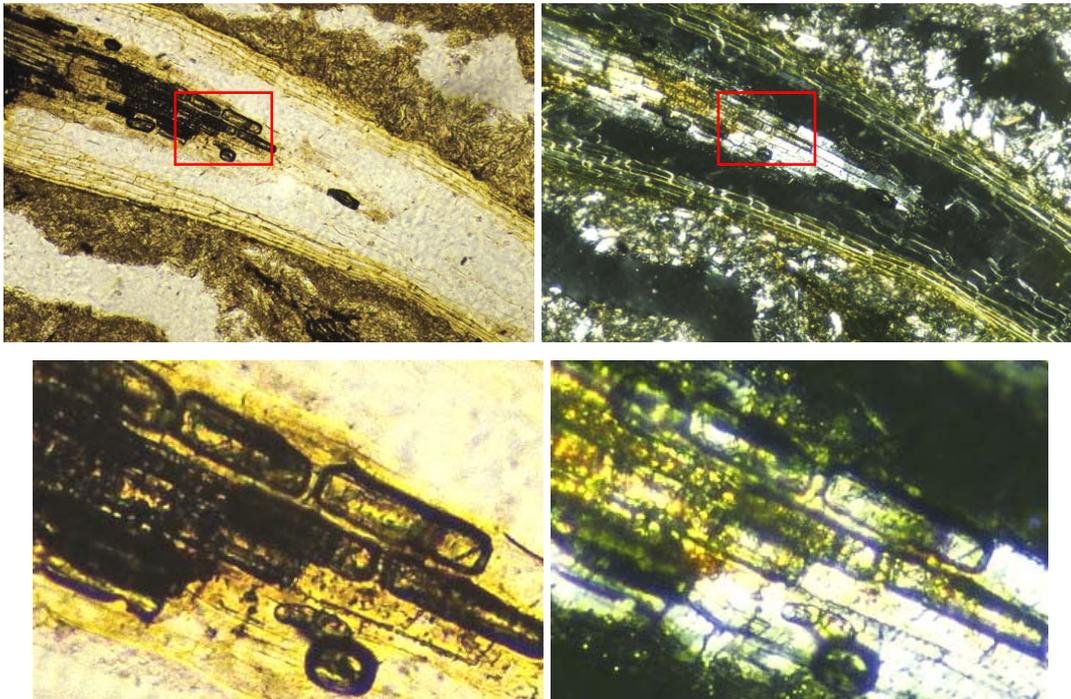
**P9.C.6. Excrementos.** Son frecuentes los excrementos esféricos de 35  $\mu\text{m}$  de diámetro, frescos, de color pardo a pardo rojizo y amorfos correspondientes a oribátidos.



Figuras IV.23, LPP y IV.24, LPC. Componente orgánico con hifas, nódulo orgánico impregnativo, fisura con revestimientos, fábrica-b microgíptica. Lado mayor 0.55 mm.



Figuras IV.25, LPP y IV.26, LPC. Calcita citomorfa, birrefringente. Masa basal constituida de yeso microcristalino y en partes micrítica. Lado mayor de las dos primeras Figuras 0.55 mm.



Figuras IV.27, LPP y IV.28, LPC. Fitolitos con clara forma celular, asociada a la raíz. Se aprecia el revestimiento de la raíz con masa basal constituida de yeso microcristalino. Lado mayor 1.09 mm.

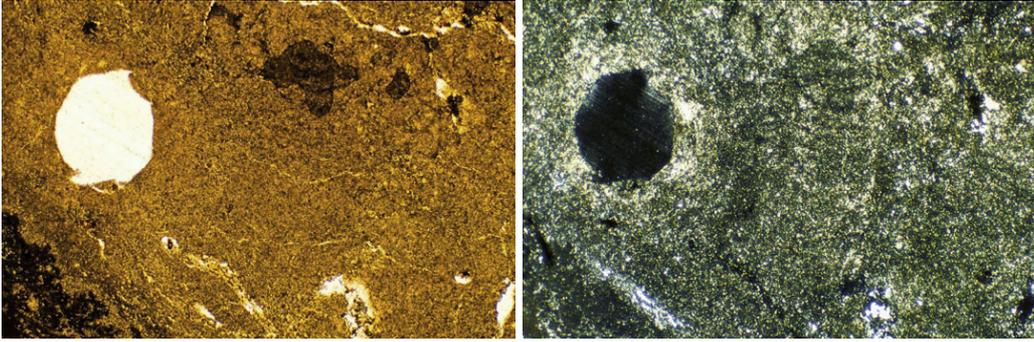
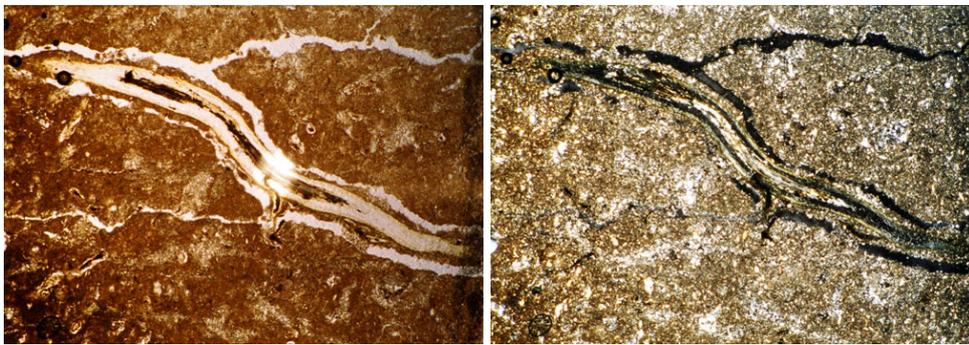
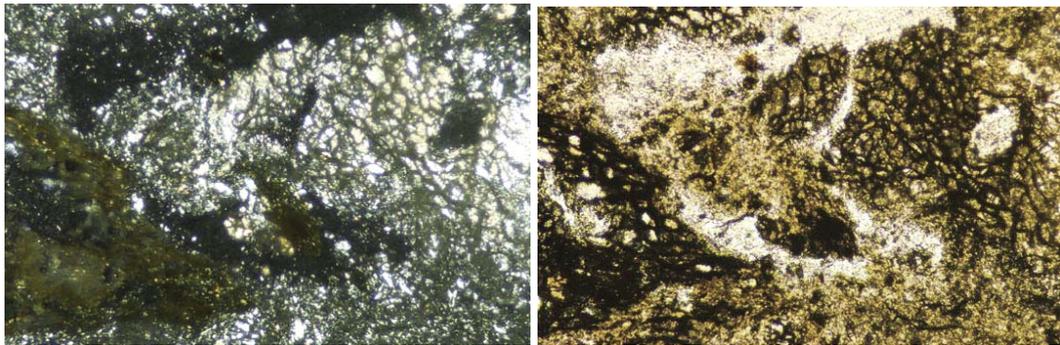


Figura IV.29, LPP y IV.30, LPC. Fábrica-b poroestriada y nódulo de yeso lenticular con revestimientos de micrita. Lado mayor 3.42 mm.



Figuras IV.31, LPP y IV.32, LPC. Raíz activa con masa basal a manera de revestimiento, constituida por yeso microcristalino y lenticular. Lado mayor 6.82 mm.



Figuras IV.33, LPP y IV.34, LPC. Nódulo de calcita citomorfa. Lado mayor 1.09 mm.

### 5.2.1.2. Perfil P12.

#### P12A. Clasificación y características del sitio.

Soil Survey Staff, 1999: Haplogypsiids léptico, limoso grueso, gypstico, térmico.

WRB, 1999: Gipsisol hipergípico, hiposálico, hiposódico.

Uso: Agostadero.

Relieve: Lomeríos alargados en dirección de la pendiente, aproximadamente de 5 m de alto, el perfil se ubica en la parte alta o somital. Superficie con presencia de costra discontinua de unos 5 mm de grosor y estructura poligonal. Las raíces de los pastos penetran a través de las grietas de la costra.

Flora: Palma china (*Yuca* sp), nopal rastrero (*Opuntia canthabrigiensis*), correoso (*Condalia lisilicus*), pastizal gipsófilo (*Muhlenbergia purpusii*), zacate banderita (*Bouteloua chasei*), cardenche (*Opuntia imbricatha*), costilla de vaca (*Atriplex canescens*), romerito (*Suaeda* sp), nopal duraznillo (*Opuntia leucotricha*), azulillo (*Ephedra*, sp).

Erosión: Laminar moderada.



Figuras IV.35 y IV.36. Sitio y perfil P12. Pastizal gipsófilo y palma china (*Yuca* sp).

#### P12B. Descripción macromorfológica.

A. Profundidad 0 – 20/30 cm. Seco. Color en seco 10YR8/2 y en húmedo 10YR7/4.

Franco limoso. Consistencia en seco blando y en saturado pegajoso y ligeramente plástico. Estructura prismática de unos 20 cm de alto por 15 cm de ancho (Figura IV.37) y bloques angulares bien desarrollados mayores a 5 cm. Raíces medias y finas muy abundantes, desarrolladas entre los prismas. Bioporos y finos abundantes. Reacción violenta al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Buen drenaje y buena permeabilidad. Sin piedras. Presencia de nódulos blancos sin

reacción al HCl al 10 % de diámetro menor o igual a un milímetro. Transición tenue y ondulada.

Y. Profundidad 20/30 – 60 cm. Ligeramente húmedo. Color en seco 10YR 8/3 y en húmedo 10YR 7/4. Franco limoso. Consistencia en húmedo firme y en saturado muy pegajoso no plástico. Estructura masiva con tendencia laminar. Raíces muy finas frecuentes. Poros raíces muy pocos, finos abundantes. Reacción violenta al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Buen drenaje y buena permeabilidad. Sin piedras.

Tabla IV.4. Resultados de los análisis físicos, químicos y mineralógicos, Pedión P12.

Profundidad cm	Horizonte	Tamaño de partículas, %			pH H <sub>2</sub> O	MO %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/kg suelo	CEes dS/m 25 °C	Cationes solubles mmol/l extracto				RAS
		Ar	L	Ac					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
		0-20/30	A				7.8	0.94	15.0	2.2	17.8	5.0	0.42
20/30-60	Y				8.7	0.23	18.0	7.9	14.9	37.6	5.50	46.2	9.01

Profundidad cm	Horizonte	CaCO <sub>3</sub> Total %	Yeso %	CIC cmol/kg suelo	Cationes intercambiables, cmol/kg suelo				PSI	Da g/cc
					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>		
		0-20/30	A	3.0	72.3	20.2	18.28	1.6	0.15	0.17
20/30-60	Y	3.5	95.7	21.6	15.64	3.8	0.66	1.50	6.9	1.09

**Mineralogía, en orden decreciente de concentración relativa, DR-X**

0-20/30	A	Yeso
20/30-60	Y	Yeso, calcita

**P12.C. Descripción micromorfológica**

**P12.C.1. Microestructura.** En el primer horizonte se tiene débil pedialidad correspondiendo solamente a tres bloques subangulares acomodados de 1.2, 4 y el tercero de 5x7.5 cm, en campo corresponde a estructura prismática 20x15 cm (Figura IV.37), la estructura de los agregados es masiva. La otra parte de la lámina corresponde a masiva vesicular con tendencia laminar. En el segundo horizonte la pedialidad es muy débil y corresponde a masiva con tendencia laminar.

**P12.C.2. Huecos.** En el primer horizonte la porosidad es del 20 %. Predominan las vesículas con un 10 % y tamaño 0.1-0.8 mm, de paredes rugosas o serradas; los canales con raíz comprenden un 4 % y su tamaño varía de 0.15 a 2.5 mm, y un 3 % son canales

sin raíz (0.15 – 1.3 mm); el 2 % son fisuras (0.02 – 0.13 mm) de paredes lisas a rugosas; el 1 % son cámaras (0.5 – 5 mm) de paredes lisas; la microestructura es masiva con vesículas. La rugosidad de los huecos se debe a los revestimientos de yeso.

En el segundo horizonte la porosidad es del 20 %. El 8 % son vesículas (0.035 a 0.2 mm) de paredes lisas a rugosas; le sigue en importancia los canales (0.2 a 0.5 mm) con 7 %, de paredes lisas a rugosas; las cámaras constituyen el 2 % (0.5 a 3.8 mm) de paredes lisas; el 3 % son fisuras muy finas ( $\leq 40 \mu\text{m}$ ) paralelas y de paredes lisas a serradas; la microestructura es masiva con tendencia laminar, con vesículas y canales.

**P12.C.3. Componentes orgánicos.** En el primer horizonte las estructuras orgánicas se presentan en 3 %, algunas son raíces activas (0.1-1.0 mm), en ellas la estructura celular se identifica con facilidad, no están flobafenizadas, son birrefringentes, y transparentes en LPP; otros restos orgánicos (0.5-2 mm) están flobafenizados, en algunos no se aprecia la estructura celular, son de color pardo oscuro a pardo rojizo en LPP, no son birrefringentes, en ambas; son raros los restos orgánicos anhistos (100-130  $\mu\text{m}$  de diámetro) flobafenizados, algunos son redondos de color rojizo.

En el segundo horizonte son frecuentes los radicohistos (0.1 – 0.3 mm) amorfos, no se aprecia la estructura celular, son de color amarillo, pardo rojizo o pardo oscuro en LPP, y pardo muy oscuro en LPC, son birrefringentes; son raros los radicohistos (0.12-0.16 mm) en los que se aprecia la estructura celular, son de color pardo amarillento en LPP y pardo en LPC, son birrefringentes.

#### **P12.C.4. Masa basal**

**P12.C.4.1. Material grueso,  $>20 \mu\text{m}$ .** En el primer horizonte la relación g/f es 3/2. El 55 % es yeso lenticular idiotópico la mayoría de 20 a 60  $\mu\text{m}$ , unos pocos llegan a medir 180  $\mu\text{m}$ , casi todos presentan líneas de polvo longitudinales y distribución básica aleatoria, y referida paralela a huecos; otros granos de yeso más pequeños (20 – 35  $\mu\text{m}$ ) son idiotópicos y se presentan radial o paralelamente en huecos a manera de revestimientos o rellenos; el cuarzo límpido es raro (1 %) y su tamaño es menor a 120  $\mu\text{m}$ ; el 4 % es calcita citomorfa de 50 a 80  $\mu\text{m}$  de bordes lisos y aspecto transparente en LPP (Figuras IV.38 a IV.40). La distribución relativa g/f es porfírica simple.

En el segundo horizonte la relación g/f también es de 3/2. El yeso es lenticular idiotópico (55 %), se presenta en tres tamaños, el 12 % son de 100 a 180  $\mu\text{m}$ , el 18 % son de 40 a 60  $\mu\text{m}$  y 25 % son de 20 a 40  $\mu\text{m}$  de diámetro; los dos últimos tamaños presentan orientación básica paralela referida a huecos, casi todos presentan líneas de polvo transversales; la calcita citomorfa (4 %) se presenta principalmente en grupos o en forma aislada, pudiéndose tratar de un corte transversal de raíz calcificada, el tamaño es ligeramente menor (50 a 60  $\mu\text{m}$ ) a los del primer horizonte (Figuras IV.38 a IV.40); el 1 % de los minerales es cuarzo límpido y se presenta en tamaños que varían de 75 a 90  $\mu\text{m}$ ; los minerales máficos son raros ( $\ll 1$  %) y el tamaño es menor a 50  $\mu\text{m}$ . La distribución relativa g/f es porfírica simple.

**P12.C.4.2. Material fino.** En los dos horizontes el material fino es de color amarillento a pardo amarillento en LPP, con color de interferencia gris, está compuesto de yeso lenticular microcristalino y microesparita. La fábrica-b microgíptica con microesparita.

#### **P12.C.5. Edaforrasgos**

**P12.C.5.1. Revestimientos.** En el primer horizonte son abundantes los revestimientos típicos con tamaño  $< 30$   $\mu\text{m}$  de microesparita birrefringente en huecos o sobre cristales, (Figuras IV.41 a IV.42); son abundantes los revestimientos de yeso lenticular hipidiotópico o idiotópico birrefringentes, con orientación radial, tamaño del revestimiento de 50-60  $\mu\text{m}$ ; están presente en huecos canales y en fisuras. Son raros los revestimientos típicos de materia orgánica en huecos y sobre cristales.

En el segundo horizonte son frecuentes los revestimientos típicos limo-carbonáticos o de microesparita, de color pardo y cuyo tamaño va desde  $< 20$  a 75  $\mu\text{m}$ , presentes en cristales y huecos; son abundantes los revestimientos de yeso lenticular idiotópico o hipidiotópico, los cristales están dispuestos en forma radial o paralela a la pared del hueco, el tamaño varía de 35 a 150  $\mu\text{m}$ ; hay un revestimiento de materia orgánica de color pardo y espesor menor a 20  $\mu\text{m}$ .

**P12.C.5.2. Rellenos.** En el primer horizonte son frecuentes los rellenos suelto incompleto, de naturaleza organo-mineral y de masa basal, del mismo color de la masa basal, algunos están redondeados por lo que pueden ser de origen animal, su tamaño es

menor a 60  $\mu\text{m}$ ; otros rellenos son densos completos presentes en las cámaras, de la masa basal, casi todas las cámaras y canales están rellenas; son abundantes los rellenos (0.15 a 0.8 mm) denso completos de yeso lenticular idiotópico, o hipidiotópico por estar parcialmente soldado, están presentes principalmente en vesículas; son frecuentes los rellenos (0.5 mm) denso completo de yeso microcristalino bien clasificado (alrededor de 20  $\mu\text{m}$ ), algunas veces se presentan junto (sin mezclarse) a yeso lenticular de aspecto perlado; el yeso lenticular presenta líneas de polvo. Son frecuentes los rellenos (1.3 mm) denso completo arqueados, compuestos de masa basal, correspondientes a pasaje de fauna, también se pueden nombrar como edaforrasgo de fábrica.

En el segundo horizonte son frecuentes los rellenos denso completo en cámaras constituidos por cuarzo, yeso lenticular, nódulos microesparíticos (0.08-0.11 mm) y micríticos (0.11 mm); son frecuentes los rellenos denso completos presentes en canales, constituidos por yeso lenticular y microcristalino pero sin mezclarse; son abundantes los rellenos de yeso lenticular en vesículas, algunos parcialmente soldados; son raros los rellenos en cámaras del tipo suelto discontinuo de calcita citomorfa de bordes lisos, son de aspecto transparente en LPP, hay algo de microesparita y de materia orgánica amorfa.

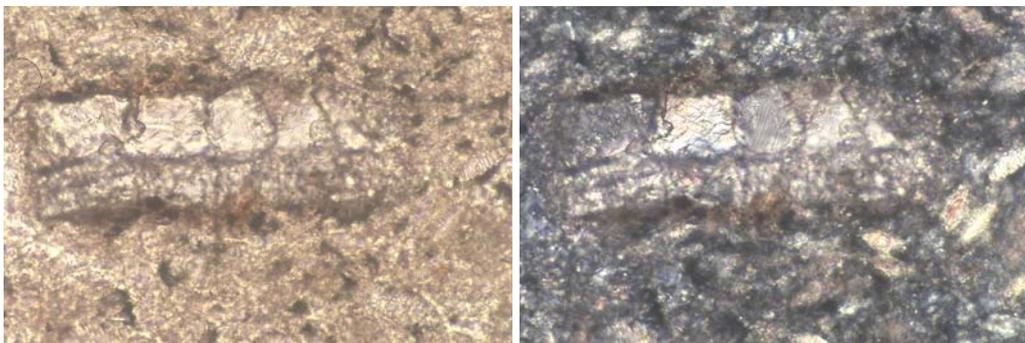
**P12.C.5.3. Nódulos.** En el primer horizonte son abundantes los nódulos órticos típicos de tamaño que va de 0.2 a 1.5 mm, son de forma irregular o subredondeados, están constituidos de yeso lenticular microcristalino, a veces están asociados a raíces (Figura IV.43 a IV.44); son abundantes los nódulos típicos órticos (0.2-1.0 mm) de yeso idiomórfico a xenomórfico no asociados a raíces (Figuras IV.45 a IV.46); son raros los nódulos típicos (60  $\mu\text{m}$ ) de color pardo, subredondeados, posiblemente de origen animal, están presentes dentro de un relleno de yeso lenticular microcristalino.

En el segundo horizonte son abundantes los nódulos órticos típicos, de 0.2 a 1.0 mm de tamaño, son de yeso lenticular idiomórfico a xenomórfico, hay predominio del yeso lenticular idiotópico; son raros los nódulos órticos típicos, de tamaño 0.2-0.3 mm, de yeso microcristalino; son frecuentes las islas de 30 a 75  $\mu\text{m}$ , de naturaleza microesparítica; son raras las islas limo arcillosas de color pardo en LPP y LPC y tamaño 110  $\mu\text{m}$ , con fábrica interna indiferenciada.

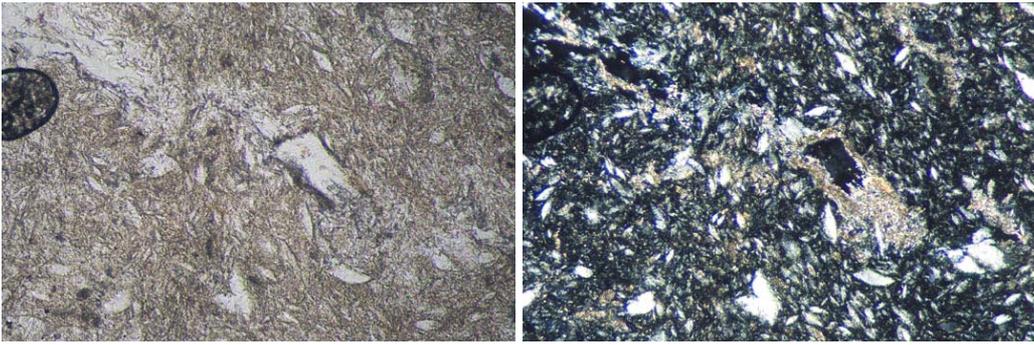
**P12.C.6. Excrementos.** En el primer horizonte son frecuentes las deyecciones de oribátidos con tamaño promedio de 40  $\mu\text{m}$ , son de color pardo rojizo, presentan fábrica-b interna indiferenciada; son raros los de 0.6 mm de diámetro y de color pardo amarillento muy parecido al de la masa basal, de forma esférica, con fábrica-b interna cristalítica gípsica, posiblemente son de larvas de *Adelidae* o *Bibionidae* (Bullock *et al.*, 1985); se detecta actividad de lombrices por la forma arqueada en que se acomodan los excrementos y son de composición igual al de la masa basal, se considera como pasaje de fauna o edaforrasgo de fábrica. En el segundo horizonte solamente hay actividad de lombrices, de composición igual a la masa basal, se detectan con menos facilidad.



Figura IV.37. Estructura prismática con costra de unos 5 mm. Tamaño 20x15 cm.



Figuras IV.38, LPP a IV.40 LPC. Calcita citomorfa en grupo o disgregada con restos orgánicos y revestimientos limo arcillosos. Fábrica-b microgípsica. Las ampliaciones están giradas para resaltar el color de interferencia. Lado mayor 3.42 y 0.55 mm.



Figuras IV.41, LPP y IV.42, LPC. Revestimiento y relleno con microesparita y micrita. Lado mayor 1.09 mm.

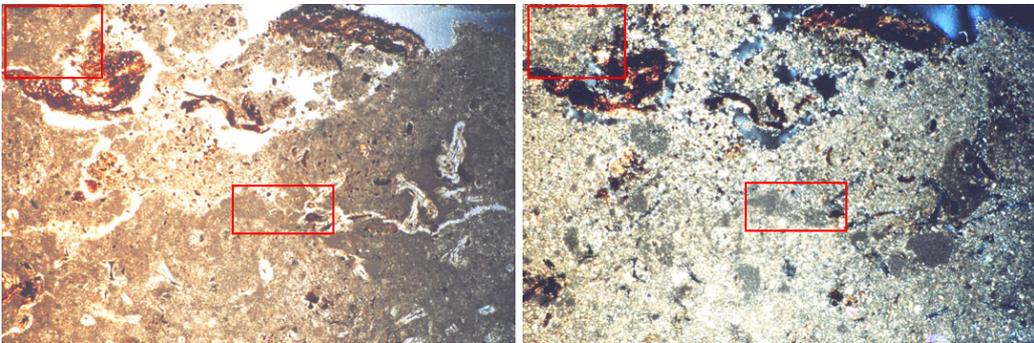


Figura IV.43, LPP y IV.44, LPC. Nódulos de yeso microcristalino asociado a restos de raíces. Fábrica-b microgíptica. Lado mayor 6.82 mm.

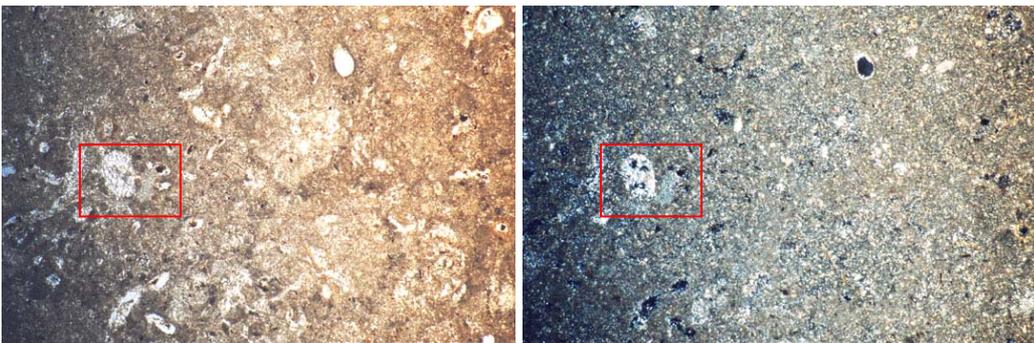


Figura IV.45, LPP y IV.46, LPC. Nódulo y rellenos de yeso lenticular idiomórfico e hipidiomórfico, no asociado a raíces. Lado mayor 6.82 mm.

#### **D. Interpretación.**

Estos dos pediones se diferencian en que el P9 presenta sello ( $\leq 1$  mm) y el P12 tiene costra de unos 5 mm de grosor y estructura poligonal (Figura IV.37) vista desde arriba. La costra además de ser más gruesa que el sello, es de mayor dureza y muy difícil de penetrar por las raíces, estas se desarrollan solamente a través de grietas y sobre las paredes de los prismas. En la parte sin costra el desarrollo radicular solamente se manifiesta, en ambos pediones, en el primer centímetro y a veces en pocos milímetros.

Verheye y Boyadgiev (1997) dicen que cuando el yeso microcristalino se encuentra en la parte superior y más seca del suelo se puede desarrollar polígonos duros, agregan que corresponde a un horizonte gípsico. La estructura prismática Bureau y Roederer (1960; citados por Verheye y Boyadgiev, 1997) la atribuyen al desarrollo de fracturas verticales entrecruzadas como resultado de una rápida desecación. Watson (1988) en Túnez y en Namibia reporta estructura poligonal vista desde arriba, y en profundidad corresponde a estructura prismática, constituida por yeso menor a 50  $\mu\text{m}$  de diámetro.

Para Watson (1988) y Watson y Nash (1997) la estructura prismática se forma por contracción volumétrica repetitiva, resultado de la deshidratación del yeso por desecación, o por contracción térmica, dicen que quizás también por deshidratación química parcial. Los anteriores autores expresan que se presenta en desiertos cálidos con precipitación menor a 300 mm. Por ejemplo en Túnez la precipitación es de 150-200 y en Namibia de 50 mm (Watson, 1988) en donde la estructura prismática tiene espesor de 1 a 2 m.

El área del perfil P12 tiene precipitación anual media de 380 mm (según estación meteorológica más cercana, El Salado, CNA, 2000), y tomando como referencia la estación meteorológica de Matehuala ubicada al sur y con precipitación promedio anual mayor a la de El Salado (479 mm, CNA, 2000), existe una evaporación de hasta 5 veces la precipitación; es decir existen condiciones de desecación rápida y decremento del volumen necesarios para la formación de la estructura prismática. El menor espesor (20 cm en el perfil y 90 cm en las cercanías) de la estructura prismática del Pedión P12, en comparación a la reportada por Watson (1988) para Namibia, posiblemente se deba a la mayor precipitación, y posiblemente los cambios en volumen sean menos intensos, manifestándose a menor profundidad.

Los horizontes superficiales de P9 y P12 tienen  $CEe = 2.2$  dS/m, debido al yeso. Sin embargo la  $CEe$  de sus respectivos horizontes subyacentes difieren fuertemente. En P9 el horizonte inferior tiene  $CEe = 2.4$  dS/m lo cual concuerda con un contenido de  $Mg^{++}$  algo superior al horizonte A; esta  $CEe$  en un suelo yesoso no parece significativa de afección por sodicidad. Muy otro es el caso de P12, con  $CEe$  de 7.9 dS/m en el horizonte inferior, de acuerdo con los contenidos de  $Mg^{++}$  y  $Na^+$ , y muy cerca del límite de 8 dS/m en la tabla citada por SSDS (1993) para suelos moderadamente salinos.

En cuanto al pH, en P9 es moderadamente alcalino y en P12 fuertemente alcalino. La mayor alcalinidad del perfil P12 posiblemente se deba a que según CRM (1992) es de origen lacustre con presencia de sales. En el segundo horizonte del perfil 12 el porcentaje de sodio intercambiable de 6.7 no es importante para las plantas, aunque puede estar siendo lavado a los suelos del fondo en los que se puede acumular a niveles tóxicos. Este nivel de sodio tampoco repercute en la estructura del suelo, al respecto Artieda (1996) dice que con bajos contenidos de arcilla y yeso superior al 10 % no tiene sentido hablar de sodicidad en términos de estabilidad estructural.

En ambos perfiles la dureza se incrementa con la profundidad, P9 cumple para petrogíptico (extremadamente duro en campo y los agregados secos no se desbaratan en agua) mas no P12. Es posible que el pedión P12 tenga horizonte petrogíptico a mayor profundidad, ya que solamente se excavó hasta 60 cm, y además con la profundidad se incrementa la dureza (más difícil de excavar) y los revestimientos de yeso xenomórfico indentado en fisuras y en vesículas, y según Artieda (1996) estas son características de endurecimiento.

En la fracción gruesa de ambos horizontes predomina el yeso idiotópico de varios tamaños, pero con tendencia a equigranular. Otros minerales acompañantes son el cuarzo, y en el perfil P9 también se tienen fitolitos y olivino y en el P12 calcita citomorfa. Mediante análisis de DR-X se identificó principalmente yeso y en muy baja proporción cuarzo (Tabla IV.3), en P12 además del yeso se determinó calcita en el segundo horizonte (Tabla IV.4).

**5.2.2. Suelos en “valle ciego”.** Estos suelos se ubican en las partes bajas de áreas cársticas, la geoforma se considera de “valle ciego” (Flores, F. J. L., 2004, comunicación personal), y ocasionalmente reciben aporte de sedimentos, sin embargo las características o propiedades fluvénticas no son evidentes, salvo que el contenido de carbono orgánico permanece por encima del 0.2 % hasta los 100 cm. Estas acumulaciones aluviales se depositaron en llanuras de inundación durante el Cuaternario (García, 1968), o posiblemente en el Pleistoceno-Holoceno (Urias, 1965), o en el Holoceno (Padilla, 1983; CRM, 1996, 2000a).

En esta geoforma se tienen los pediones P10 y P13. El P10 se localiza al norte de la Zona Media, a unos 4250 metros al este del poblado Tanque de Agua, municipio de Ciudad del Maíz. El P13 se sitúa en el Altiplano a unos 7.5 km al norte de San Vicente, municipio de Vanegas.

#### 5.2.2.1. Perfil 10, P10.

##### P10.A. Clasificación y características del sitio.

Soil Survey Staff, 1999: Calcigypsid típico, fino, mezclado, superactivo, térmico.

WRB, 1999: Kastanozem gípsico, orticálcico, siltico.

Uso: Agrícola, cultivos anteriores maíz, girasol y calabaza.

Relieve: Área cárstica, pendiente del 2 %.

Flora: Mezquite (*Prosopis laevigata*), *Condalia mexicana*, huizache (*Acacia* sp.).

Erosión: Área de acumulación



Figuras IV47 y 48. Sitio y perfil P10. La flecha indica la parte alta o somital equivalente al área del perfil P9 ubicado a unos 10 km de este Pedión. Tipo de vegetación matorral desértico, el árbol corresponde a mezquite, *Prosopis laevigata*, y los demás a huizache *Acacia* sp.

**P10.B. Descripción macromorfológica**

- Ap. Profundidad 0 – 15 cm. Seco. Color en seco 10YR 4/2 y en húmedo 10YR 3/2. Franco arcilloso. Ligeramente duro en seco y pegajoso y plástico en saturado. Estructura granular de unos 10 mm de diámetro. Raíces finas muchas, medias comunes. Poros finos comunes. Permeable con buen drenaje. Sin piedras. Transición marcada y horizontal.
- Bwk. Profundidad 15- 35/45 cm. Seco. Color en seco 10YR 6/2 y en húmedo 10YR 4/2. Franco arcilloso. Ligeramente duro en seco y pegajoso y plástico en saturado. Estructura bloques subangulares bien desarrollados. Raíces finas comunes y medias pocas. Poros finos muchos y medios pocos. Permeable y con buen drenaje. Sin piedras. Grietas de aproximadamente 1 cm de ancho. Transición tenue y ondulada.
- Bwk2. Profundidad 35/45 – 87 cm. Seco. Color en seco 10YR 6.5/2 y en húmedo 10YR 5.5/2. Franco arcilloso con gravilla. Ligeramente duro en seco –más blanda que el segundo horizonte- y plástico no pegajoso en saturado. Estructura bloques subangulares de unos 10 cm bien desarrollados. Raíces medias pocas. Poros muy finos abundantes. Rellenos en poros canales. Permeable y con buen drenaje. Sin piedras. Sin grietas. Transición tenue y ligeramente ondulada.
- 2Y. Profundidad 87 – 115 cm. Seco. Color en seco 10YR 6.5/2 y en húmedo 10YR 5.5/2. Franco arenoso. Blando en seco y ligeramente plástico y pegajoso en saturado. Estructura masiva con tendencia laminar. Raíces medias comunes. Poros muy finos abundantes. Muy permeable y con buen drenaje. Sin piedras.

Tabla IV.5. Resultados de los análisis físicos y químicos, Pedión P10.

Profundidad cm	Horizonte	Tamaño de partículas, %			pH H <sub>2</sub> O 1:2.5	MO %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/kg suelo	CEes dS/m 25 °C	Cationes solubles mmol <sub>e</sub> /l extracto				RAS
		Ar	L	Ac					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
		0-15	Ap	1.3					51.0	47.7	8.0	1.70	
15-35	Ak	2.9	56.0	41.1	8.1	2.60	340.0	0.64	4.10	1.80	0.37	0.40	0.25
35-87	Abk	2.3	58.7	39.0	8.1	2.50	481.0	0.44	4.07	1.85	0.10	0.40	0.23
87-115	2Y				7.5	1.09	27.0	1.90	19.80	3.50	0.14	0.45	0.14

Profundidad cm	Horizonte	CaCO <sub>3</sub> Total %	Yeso %	CIC cmol <sub>e</sub> /kg suelo	Cationes intercambiables, cmol <sub>e</sub> /kg suelo				PSI	Da g/cc
					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>		
					0-15	Ap	16.0	0.40		
15-35	Ak	29.0	0.60	26.0	19.44	4.4	2.0	0.16	0.6	1.3
35-87	Abk	43.0	0.35	25.0	19.61	4.5	0.75	0.14	0.6	1.2
87-115	2Y	20.0	52.80	18.0	13.55	3.8	0.45	0.20	1.1	1.1

### P10.C. Descripción micromorfológica.

**P10.C.1. Microestructura.** El primer horizonte tiene buena o fuerte pedialidad. La estructura es granular compleja-laminar, esponjosa, conformada por agregados esferoidales a subangulares, tamaño de 0.05 a 1.0 mm, los más grandes son semialargados con cierta horizontalidad; aisladamente hay bloques subangulares parcialmente acomodados, con tamaño de 0.5 a 2 mm. El segundo horizonte tiene moderada pedialidad con estructura de bloques subangulares esponjosos parcialmente acomodados, su tamaño varía de 0.1 a 1.5 cm, de paredes suaves; además se presentan agregados pequeños menores a 0.5 mm.

El tercer horizonte tiene buena pedialidad. La estructura también es de bloques subangulares esponjosos, parcialmente acomodados, de paredes suaves bien desarrollados, de 0.15 a 3 cm; hay pocos agregados pequeños (0.06 – 0.5 mm). La pedialidad del cuarto horizonte es débil, los agregados consisten de islotes de material fino limo arcilloso de dos tamaños; unos son de 0.15 a 4 mm de diámetro de color pardo, punteados y subangulares y otros de 0.36 – 0.15 mm subredondeados. Presenta organización en islas.

**P10.C.2. Huecos.** En el primer horizonte la porosidad es del 35 % y consiste de poros de empaquetamiento compuesto (20 %) con tamaño que va desde  $< 20 \mu\text{m}$  a  $550 \mu\text{m}$  de paredes lisas; fisuras con cierta horizontalidad (10 %) y tamaño 0.45 a 1.7 mm. Un 5 % de los poros corresponden a cámaras de 0.5 a 3 mm de diámetro y paredes lisas, la microestructura es granular compleja–laminar esponjosa.

La porosidad del segundo horizonte es del 35 %. Los poros de empaquetamiento compuesto constituyen el 15 %, el tamaño va desde  $< 20$  a  $400 \mu\text{m}$ ; le sigue en importancia las fisuras con un 8 %, 0.04 – 2.0 mm, los canales con un 5 % y tamaño 0.4 – 1.8 mm (arena media a arena muy gruesa); un 5 % son cámaras de 0.7 – 6 mm, y el 2 % son vesículas interagregados con tamaño de 0.09 a 0.3 mm; todos los poros tienen paredes lisas. La microestructura es bloques subangulares esponjosos.

La porosidad del tercer horizonte es del 35 %. El 18 % son poros de empaquetamiento compuesto con tamaños desde  $< 20$  a  $200 \mu\text{m}$  interagregados; el 6 % son canales con tamaño de 0.15 a 3.0 mm, fisuras con un 6 % y tamaño de 0.04 a 0.7 mm (limo a arena gruesa); cámaras con un 4 % y tamaño desde 0.3 hasta 3.0 mm, y vesículas interagregados con el 1 % y tamaño de 0.09 a 0.25 mm. La microestructura es de bloques subangulares esponjosos.

En cuarto horizonte la porosidad es del 30 %. El 17 % son poros de empaquetamiento compuesto con tamaños de 30 a  $150 \mu\text{m}$ ; el 6 % son canales con tamaño de 0.4 a 1.0 mm; el 3 % son cámaras con tamaño de 0.75 a 6.5 mm; el 3 % son fisuras con tamaño de 0.3 a 1.5 mm; el 1 % son vesículas con tamaño de 0.06 a 0.5 mm. Tiene organización en islotes.

**P10.C.3. Componentes orgánicos.** En el primer horizonte existen raíces con tamaños de 0.15 a 1.3 mm de color amarillento a pardo rojizo debido al flobafeno, birrefringentes, se aprecia claramente la estructura celular; radicohistos de 0.5 mm de grueso, de color rojo en LPP, birrefringentes, corresponden a corteza de raíz y no se aprecia la estructura celular; restos orgánicos anhistos de  $75 \mu\text{m}$ , dentados y semicirculares, de color rojo o amarillo tenue; otros están carbonatados y no se aprecia la estructura celular; algunos son amorfos de color pardo oscuro o rojizo, en ellos

solamente se aprecia el borde; existen bioclastos carbonáticos (MacKenzie y Adams, 1997) posiblemente restos de ostrácodos, birrefringentes; estructuras orgánicas circulares flobafenizadas y esporas (Figuras IV.49 y IV.50).

En el segundo horizonte la actividad biológica es menor presentándose restos orgánicos anhistos de color rojo o amarillo en LPP, sin birrefringencia y no se detecta la estructura celular; raíces frescas de color amarillo tenue o muy viejas en las que solamente se aprecia el borde; restos de ostrácodos. En el tercer horizonte se detecta poca actividad de raíces la mayoría flobafenizadas y algunos restos orgánicos anhistos amarillos (Figuras IV.49 y IV.50) o rojos. Restos de paja amarillo en LPP y LPC, birrefringente de 1.5 mm. Raros nidos de esporas, de color pardo oscuro. Asociado a tejidos hay manto fúngico de color morado (Figuras IV.51 y IV.52). En el cuarto horizonte se tienen raras raíces de 1.5 mm, flobafenizadas, de color amarillo a rojizo en LPP, y pardo oscuro en LPC, con whewelita [oxalato de calcio ( $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )]. Tejidos orgánicos amarillos a rojizos en LPP y pardo muy oscuro en LPC, de 0.1 a 0.5 mm.

#### **P10.C.4. Masa basal.**

**P10.C.4.1. Material grueso.** La relación de gruesos y finos en el primer horizonte es de 1/4. Predomina la esparita (8 %) con tamaño de alrededor de 20 a 80  $\mu\text{m}$ , birrefringentes; el cuarzo constituye un 4 % y es de 20 a 65  $\mu\text{m}$  de diámetro; esferulitas con interferencia pseudouniaxial con extinción en cruz (Figuras IV.53 y IV.54), de 50 a 110  $\mu\text{m}$  de diámetro y en porcentaje menor al 1 %; el 1 % son esferulitas radiales (Figuras IV.55 y IV.58) de tamaño 50 – 125  $\mu\text{m}$ ; los minerales máficos comprenden el 5 %; también hay calcita en porcentaje menor al 1 %; el olivino es < al 1 % y de 30  $\mu\text{m}$  de diámetro; la whewelita con tamaño de < 20 a 35  $\mu\text{m}$  presente en menos del 1 % de la lámina, relacionada a tejidos orgánicos (Figuras IV.59 y IV.60). La distribución relativa g/f es porfírica abierta.

En el segundo horizonte la relación grueso/fino es de 3/7. Predomina la esparita (15 %, 20 a 80  $\mu\text{m}$ ); el cuarzo (20-90  $\mu\text{m}$ ) constituye el 7 %; los máficos conforman el 6 %, y el olivino de 30 a 70  $\mu\text{m}$  constituye un porcentaje cercano al 2 %. La distribución relativa g/f es porfírica abierta. En el tercer horizonte la relación grueso/fino también es de 3/7. La esparita comprende un 22 % de la fracción gruesa con tamaño de 20 a 40  $\mu\text{m}$ ,

le sigue en importancia el cuarzo (20 – 70  $\mu\text{m}$ ) con un 5 %; los máficos con un 3 %; por último el olivino de 35  $\mu\text{m}$  de diámetro y porcentaje menor al 1 %. La distribución relativa g/f es porfírica abierta.

En el cuarto horizonte la relación grueso/fino es de 2/3. Constituida básicamente por yeso lenticular (26 %) idiomorfo e hipidiomorfo, de tamaño 0.02 a 0.4 mm, algunos cristales corroídos miden 20x300  $\mu\text{m}$  el yeso, con acreciones, líneas de polvo transversales (Figuras IV.61 y IV.62), orientados a huecos y a cristales más grandes; el 10 % es yeso con macla en punta de flecha y tamaño 0.23x1.5 mm (Figuras IV.63 y IV.64); el cuarzo constituye el 4 %. La distribución relativa g/f es porfírica cerrada a doble espacio. Además tiene organización en islotes.

**P10.C.4.2. Material fino.** En los dos primeros horizontes el material fino es de color pardo en LPP y pardo grisáceo en nícoles cruzados, birrefringente, la fábrica-b es cristalítica microesparítica. En el tercer horizonte es de color pardo amarillento en LPP y gris verdosa en LPC, birrefringente, de naturaleza microesparítica, cuarzo y máficos; la fábrica-b es cristalítica microesparítica. En el último horizonte el material fino es de color pardo amarillento constituido de microesparítica y yeso microcristalino. La fábrica-b es microesparita y microgípsica, las islas tienen fábrica-b microesparítica. Organización en islas.

#### **P10.C.5. Edaforrasgos.**

**P10.C.5.1. Revestimientos.** En el primer horizonte son abundantes los revestimientos típicos de materia orgánica de color pardo rojizo en LPP, en agregados, minerales y en los huecos o bordes de los nódulos de microesparita; Son frecuentes los revestimientos típicos de calcita microesparítica en huecos; son frecuentes los hiporrevestimientos de empobrecimiento de calcio, con fábrica-b estriada, algunos relacionados a restos orgánicos (Figura IV.65 y IV.66), con o sin esparita asociada.

En el segundo horizonte los revestimientos típicos de materia orgánica son raros; son frecuentes los hiporrevestimientos de empobrecimiento de calcio, grises en LPC, pardo amarillento en LPP, fábrica-b estriada o grano estriada, algunos con recristalización de

carbonatos de calcio de hasta 50  $\mu\text{m}$ . Las áreas de descalcificación se presentan alrededor de huecos o en agregados sin relación a huecos.

En el tercer horizonte los revestimientos típicos de materia orgánica son pocos; los más frecuentes corresponden a típicos de microesparita sobre agregados y minerales. Son abundantes los hiporrevestimientos de empobrecimiento o zonas de descalcificación con fábrica grano estriada y con o sin formación de esparita. En este horizonte también existe una línea de presión (60  $\mu\text{m}$ ) birrefringente y de color amarillo en LPC y pardo en LPP el cual a su vez presenta una revestimiento de material similar al de la masa basal (Figuras IV.67 y IV.68).

En el cuarto horizonte son frecuentes los revestimientos típicos de micrita sobre agregados, cristales de yeso y en huecos; también se encuentran líneas de presión grises en LPC y con menor birrefringencia que los del anterior horizonte, rodeando una cámara, fracturadas y dispersadas. Son abundantes los hiporrevestimientos de empobrecimiento de calcio de color gris en LPC y pardo tenue en LPP, fábrica-b estriada, presentes en agregados sin relacionarse con huecos o raíces, y sin o con esparita asociada.

**P10.C.5.2. Rellenos.** En el primer horizonte solamente hay dos cámaras rellenas tipo suelto discontinuo con masa basal no se aprecian rellenos. En el segundo horizonte son frecuentes los rellenos suelto discontinuo con masa basal en cámaras; son frecuentes los rellenos discontinuo suelto (0.06 – 0.3 mm) de color amarillento a pardo rojizo en LPP, ovalados correspondiendo a excrementos, asociado a tejido orgánico; otros rellenos frecuentes son suelto discontinuo (20 – 30  $\mu\text{m}$ ), birrefringentes, correspondiendo a calcita citomorfa o pseudoesparita (Figuras IV.69 y IV.70) formada en zonas de descalcificación.

En el tercer horizonte son frecuentes los rellenos sueltos continuos o discontinuos de masa basal en cámaras; son frecuentes los rellenos discontinuo suelto de masa basal, esferulitas, y de excretas redondeadas de 0.4 mm de diámetro; son raros los rellenos del tipo continuo suelto, con tamaño 0.1 – 0.4 mm, de color pardo de origen orgánico con

revestimientos de calcita microesparita, con frecuencia asociados a zonas de descalcificación; son frecuentes los rellenos continuos a discontinuo suelto, de esparita. En el cuarto horizonte son frecuentes los rellenos sueltos continuos o discontinuos en cámaras y canales, con agregados de masa basal, algunos con descalcificación; son frecuentes los rellenos de tipo suelto continuo, birrefringente, color de segundo orden, asociado a zonas de descalcificación, correspondiendo a pseudomórfosis de tejido vegetal por calcita, con aspecto subredondeado.

**P10.C.5.3. Nódulos.** En el primer horizonte son frecuentes los nódulos típicos órticos de tamaño 0.08 a 2 mm, de esparita con esferulitas con interferencia pseudouniaxial; nódulos típicos disórticos, tamaño 0.1 a 0.5 mm, constituido de esparita; Raros nódulos típicos anórticos, esféricos, de tamaño 0.1 a 0.5 mm, con revestimientos de micrita.

En el segundo horizonte son frecuentes los nódulos típicos disórticos densos los más grandes son subredondeados y naturaleza limo carbonáticos, y los más pequeños son redondeados, de 0.2 a 3 mm de diámetro, con revestimientos de micrita; son frecuentes los nódulos típicos densos disórticos subredondeados, constituidos por micrita; son raros los nódulos órticos típicos amorfos de color pardo en LPP, fábrica interna cristalítica esparítica, tamaño 0.8 a 1.5 mm y conformados por agregados subredondeados o subangulares de masa basal, esparita; son raros los nódulos órticos típicos de 1.0 a 1.5 mm, constituidos por material orgánico amorfo, trozos de tejido vegetal flobafenizados, microesparita y granos de esparita dispersa.

En el tercer horizonte son frecuentes los nódulos típicos, órticos, con tamaños 0.06 a 0.25 mm, de color grisáceo en LPC y pardo tenue en LPP, fábrica interna cristalítica microesparítica; Son frecuentes los nódulos órticos típicos de tamaño que varía de 0.1 a 0.5 mm, masivos, con fábrica interna cristalítica microesparítica; otros son típicos, varios de ellos con descalcificación.

En el cuarto horizonte son raros los nódulos típicos órticos de tamaño 0.5 a 1.0 mm, de yeso xenomórfico o hipidiomórfico. Son raros los nódulos típicos de microesparita, subredondeados con revestimientos de micrita, de tamaño 0.8 a 0.2 mm, fábrica cristalítica microesparítica.

**P10.C.6. Excrementos.** En el primer horizonte no se detectaron excrementos. En el segundo son abundantes los excrementos esferoidales, de color pardo a pardo rojizo, relacionados a restos orgánicos, correspondientes a oribátidos. Son raros los esféricos con o sin descalcificación, de 0.2 mm de tamaño, fábrica-b cristalítica microesparítica, posiblemente correspondan a larvas de *Adelidae* o *Bibionidae* (Bullock *et al.*, 1985).

En el tercer horizonte son frecuentes las excretas esféricas de 0.2 a 0.4 mm, con o sin descalcificación, fábrica-b cristalítica microesparítica, posiblemente sean de *Adelidae* o *Bibionidae* (Bullock *et al.*, 1985). Son raros los esferoidales de color amarillo a pardo en LPP, conservados, correspondientes a oribátidos. En el cuarto horizonte no se aprecia actividad de mesofauna.

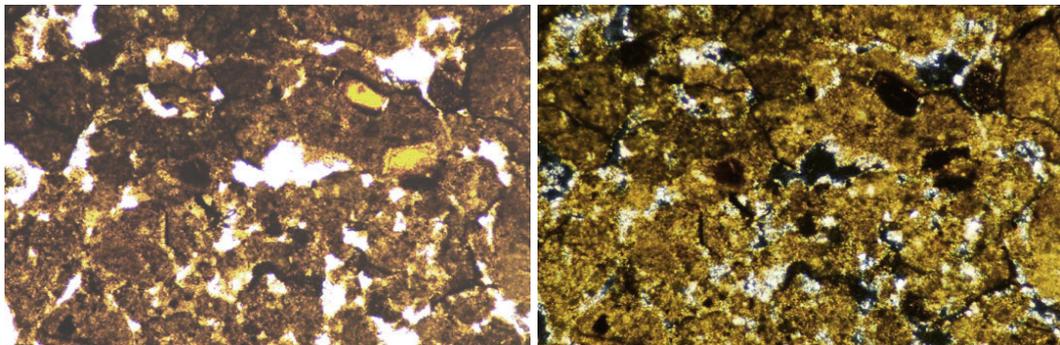
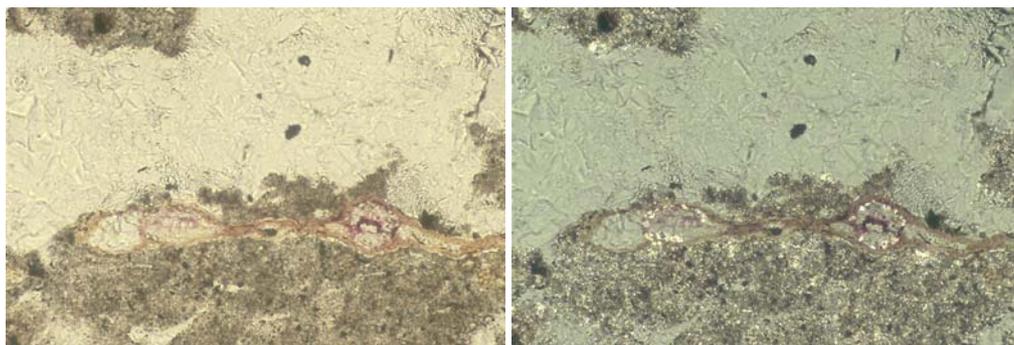
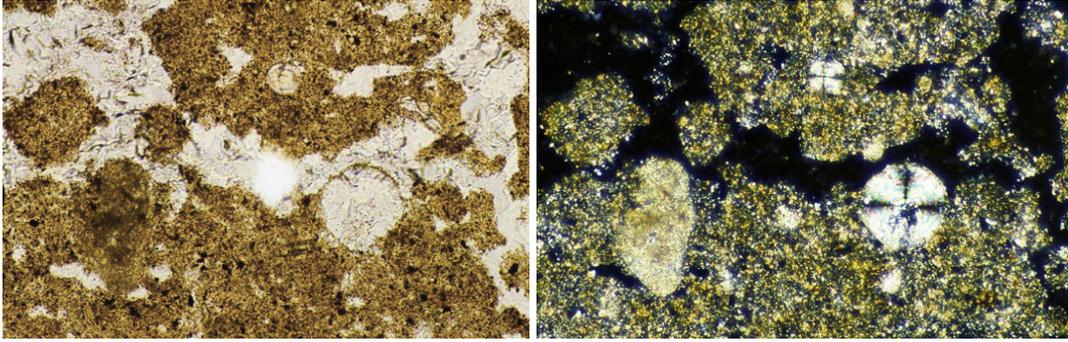


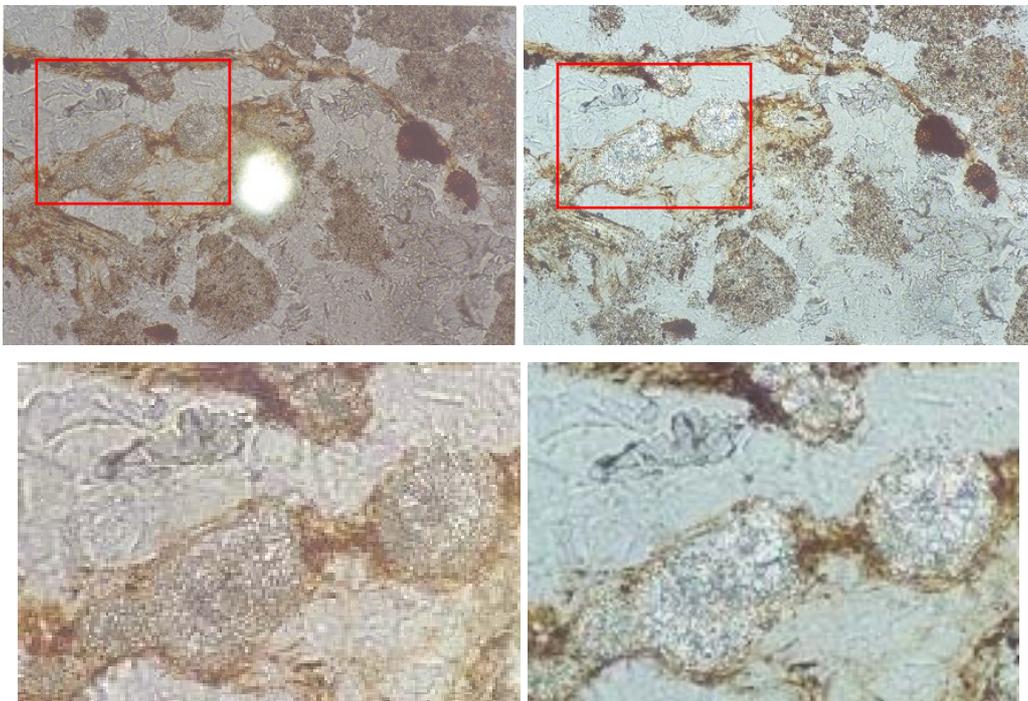
Figura IV.49, LPP y IV.50, LPC. Componentes orgánicos anhistos amarillos. Lado mayor 1.09 mm.



Figuras IV.51, LPP y IV.52, LPC. Manto de color morado correspondiente a hongos, con cristales muy finos de whewelita de tamaño aproximado a 5  $\mu\text{m}$ . Lado mayor 0.55 mm.



Figuras IV.53, LPP y IV.54, LPC. Esferulitas con interferencia pseudouniaxial. Lado mayor 0.55 mm.



Figuras IV.55, LPP y IV.56, LPC. Esferulitas con estructura radial típica y restos de vainas orgánicas sin esferulitas y otras con estructura semejante a “pelotita de ping-pong” posibles revestimientos de la esferulita o esporas; lo anterior denota el origen orgánico de este tipo de formación de compuestos cálcicos. Lado mayor de las dos primeras Figuras 0.55 mm, las dos últimas son acercamientos.

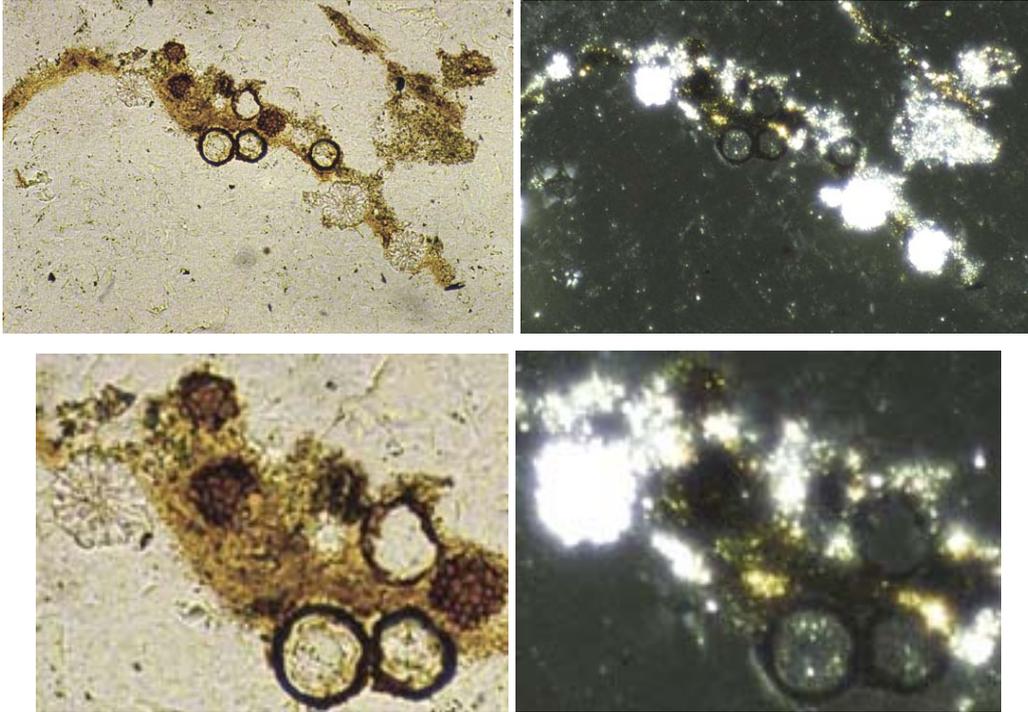
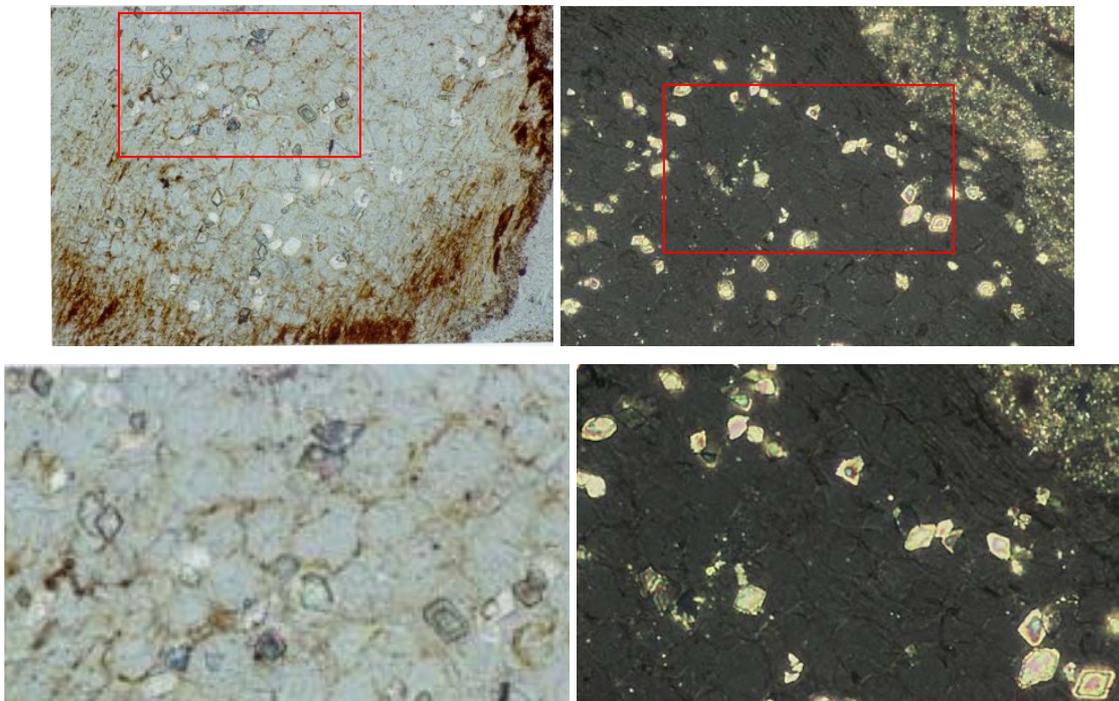
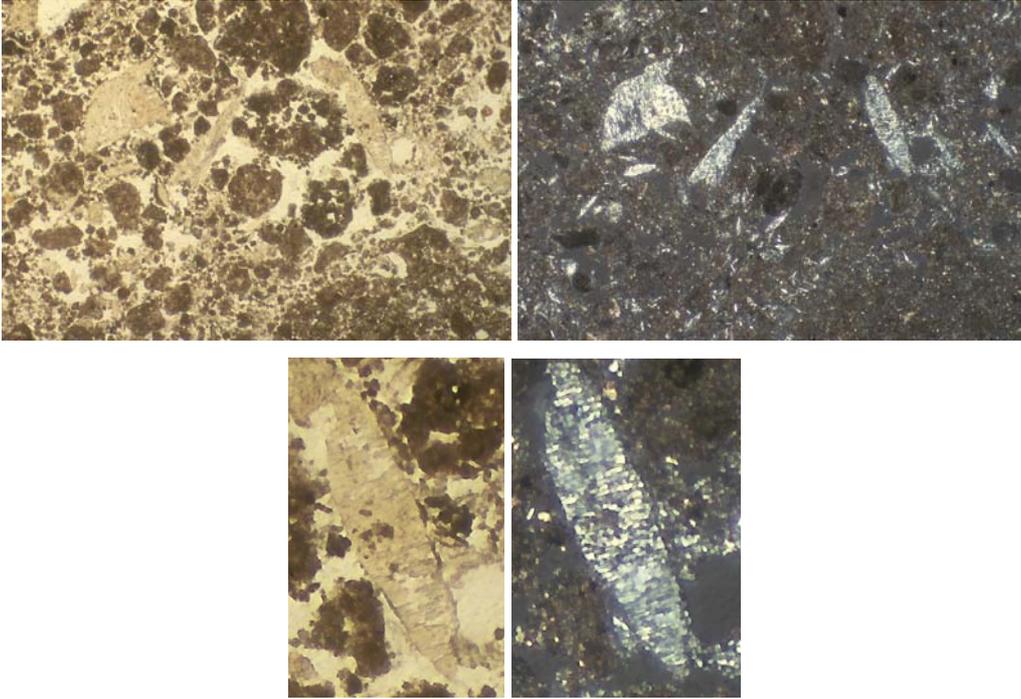


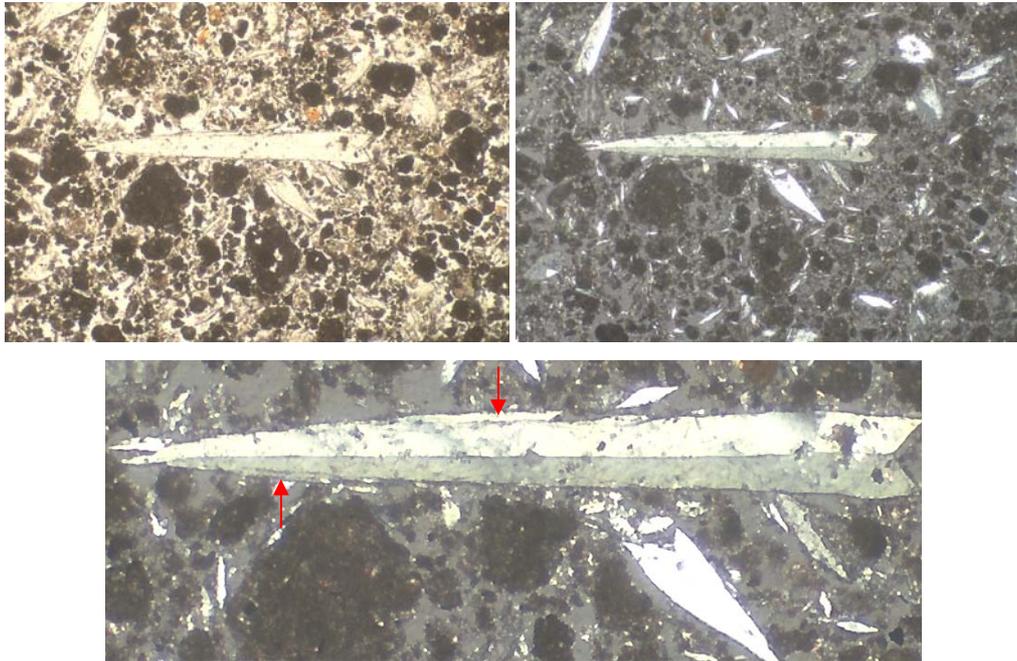
Figura IV.57, LPP y IV.58, LPC. Esporas, estructura orgánica circulares flobafenizadas y esferulitas. Lado mayor 0.55mm.



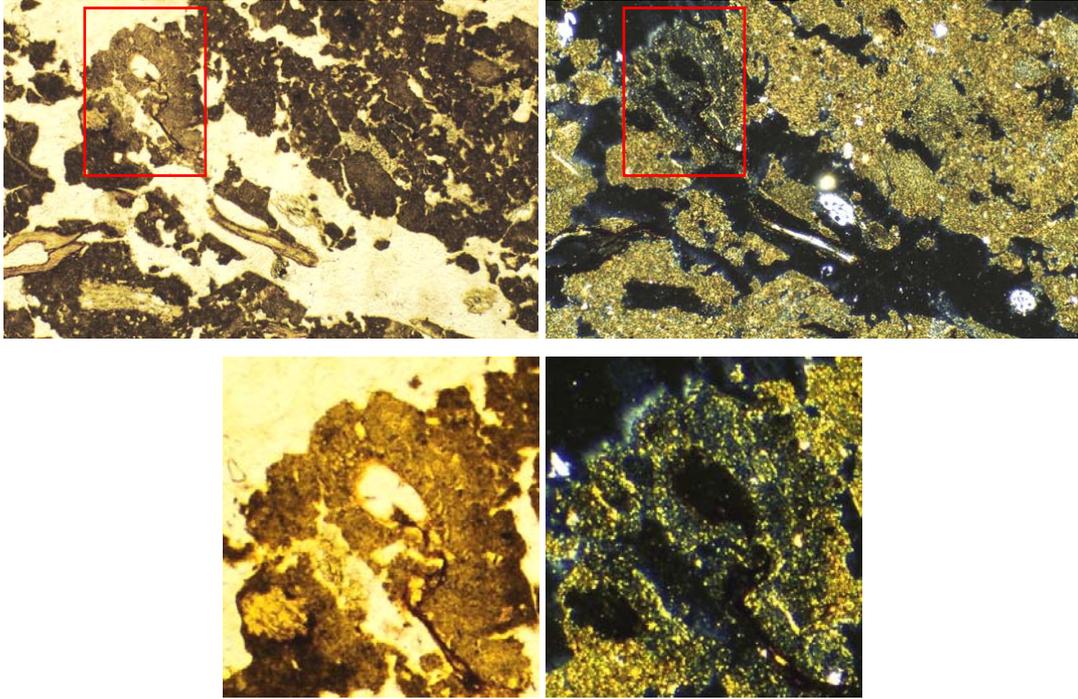
Figuras IV.59, LPP y IV.60, LPC. Oxalato de calcio rómbico, posiblemente whewelita, formada en tejidos orgánicos. La primera Figura ampliada se giró un poco para poder apreciar los rombos. Lado mayor 0.55 mm.



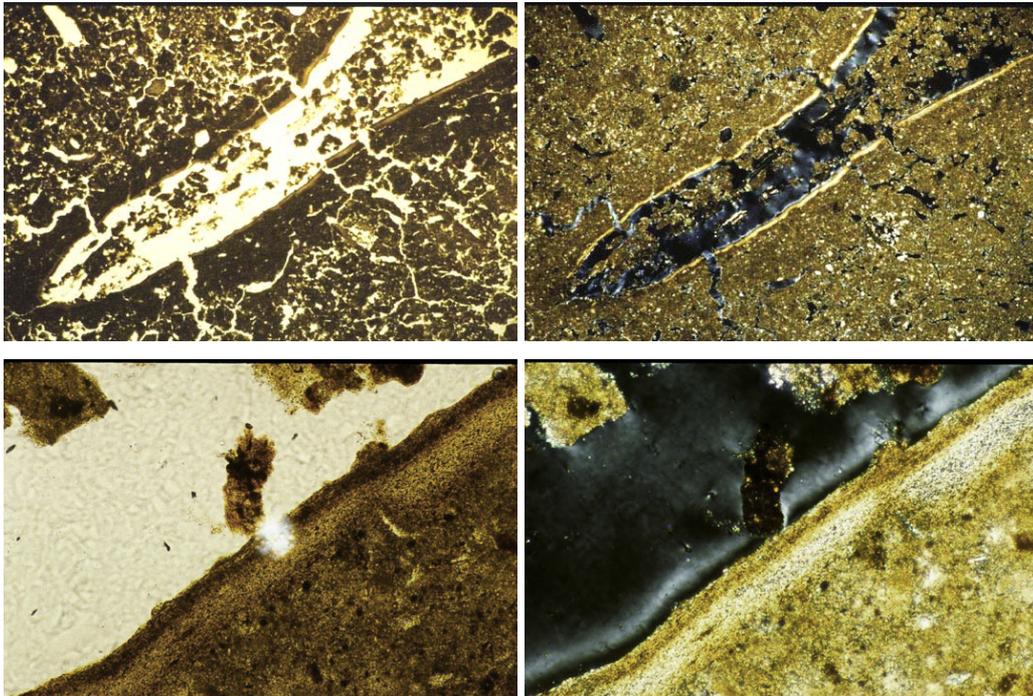
Figuras IV.61, LPP y IV.62, LPC. Yeso lenticular y con macla en punta de flecha con inclusiones transversales de masa basal carbonática. Lado mayor 3.4 mm.



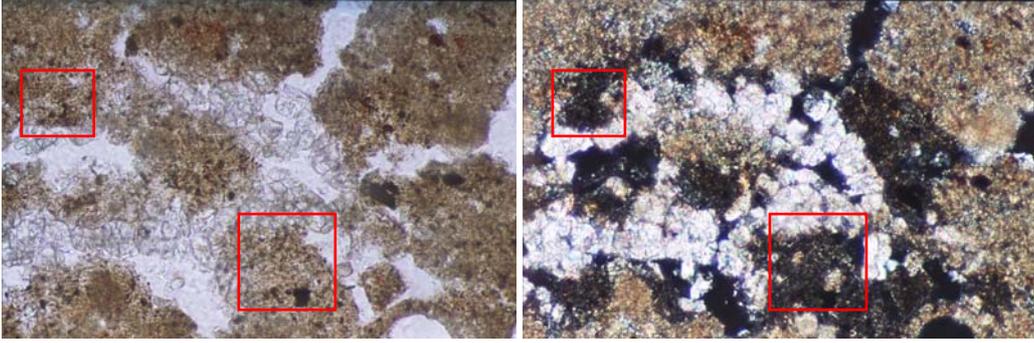
Figuras IV.63, LPP y IV.64, LPC. Organización en islas y yeso con macla en punta de flecha o de lanza con acreciones lenticulares o posibles desprendimientos. Lado mayor 3.4 mm.



Figuras IV.65, LPP y IV.66, LPC. Hiporrevestimientos de empobrecimiento o descalcificación sin recristalización de carbonato de calcio. Lado mayor 3.4 mm.



Figuras IV.67, LPP y IV.68, LPC. Líneas de presión causada por la penetración de la raíz, en proceso de fragmentación. Fábrica-b calcítica microesparítica. Lado mayor del primer par 6.8 mm y del segundo 0.55 mm.



Figuras IV.69, LPP y IV.70, LPC. Zonas de descalcificación rodeando al hueco en forma discontinua o dentro del mismo, esparita cinomorfa a manera de relleno denso incompleto. Lado mayor 0.55 mm.

### 5.2.2. Perfil P13.

#### P13.A. Clasificación y características del sitio.

Soil Survey Staff, 1999: Calcigypsid típico, limoso fino, mezclado, superactivo, térmico.

WRB, 1999: Gipsisol orticálcico, hipergípsico, hiposódico, síltico.

Uso: Agricultura de temporal y agostadero.

Relieve: Lomeríos generalmente alargados generalmente en dirección a la pendiente, aproximadamente de 5 m de alto, la calicata se ubica en área hundida o dolina, plana.

Flora: Palma china (*Yuca filífera*), mezquite (*Prosopis glandulosa*).

Erosión: Laminar moderada.



Figuras IV.71 y IV.72. Sitio y Perfil P13. En el centro de la primera fotografía se muestra el “valle ciego” dedicado a la agricultura de temporal y remanentes de vegetación original de mezquite, *Prosopis glandulosa*. El primer plano corresponde al Pedión P12.

#### P13.B. Descripción macromorfológica.

Ap. Profundidad 0 – 20 cm. Ligeramente húmedo. Color en seco 10YR 5.5/1 y en húmedo 10YR 4/2. Franco arcilloso. Consistencia en seco duro y en saturado muy pegajoso y plástico. Estructura bloques subangulares con buen desarrollo, tamaño de hasta 3 cm. Raíces medias comunes y finas muchas. Poros finos muchos, canales interagregados. Reacción violenta al HCl al 10 % y fuerte al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Buen drenaje, con buena permeabilidad. Sin piedras. Agregados de mayor tamaño posiblemente por la acción de las raíces. Transición tenue y ligeramente ondulada.

A2. Profundidad 20 – 48/55 cm. Ligeramente húmedo. Color en seco 10YR 6/2 y en húmedo 10YR4/3. Franco arcilloso. Consistencia en seco duro y en saturado muy

pegajoso y muy plástico. Estructura bloques subangulares, menores o iguales a 2 cm bien desarrollados. Raíces medias muy pocas y finas muchas. Canales interagregados y finos muchos. Reacción violenta al HCl al 10 % y abundante al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Buen drenaje con buena permeabilidad. Sin piedras. Transición tenue y ondulada.

Bwk. Profundidad 48/55 – 80 cm. Ligeramente húmedo. Color en seco 10YR 7/2 y en húmedo 10YR 4.5/4. Franco arcilloso. Consistencia en seco ligeramente duro y en saturado ligeramente pegajoso y ligeramente plástico. Estructura masiva con tendencia a granular de hasta 3 cm, de desarrollo débil. Raíces finas y muy finas muchas, gruesas raras. Poros raíces medianos y finos muchos. Reacción muy violenta al HCl al 10 % y mediana al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Buen drenaje, con buena permeabilidad. Sin piedras. Presencia de cristales blanquicos, transparentes, muy finos. Transición marcada y ligeramente ondulada.

2Y. Profundidad 80 – 102 cm. Húmedo. Color en seco 10YR 8/2 y en húmedo 7/4. Franco limoso. Consistencia en húmedo extremadamente duro y en saturado ligeramente pegajoso no plástico. Estructura masiva con tendencia a bloques subangulares, poco desarrollados. Raíces muy finas frecuentes. Poros muy finos muchos. Reacción muy leve al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Buen drenaje con buena permeabilidad. Sin piedras. Presencia de cristales que brillan al sol, de color blanco y oscuro. Canales de raíces rellenos cuyo material presenta baja reacción al HCl al 10 %.

Tabla IV.6. Resultados de los análisis físicos, químicos y mineralógicos, Pedión P13.

Profundidad cm	Horizonte	Tamaño de partículas, %			pH H <sub>2</sub> O 1:2.5	MO %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/kg suelo	CEes dS/m 25 °C	Cationes solubles mmol/l extracto				RAS
		Ar	L	Ac					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
0-20	Ap	0.5	64.0	35.5	7.9	3.7	840	2.1	13.0	7.0	1.5	0.9	0.27
20-48/55	A2	0.9	61.0	38.1	8.0	3.2	596	2.6	14.0	13.0	1.8	2.1	0.60
48/55-80	Bwk	1.8	70.0	28.2	7.8	1.0	26.5	2.8	15.0	14.0	1.9	3.9	1.00
80-102	2Y				8.2	1.1	66.0	7.3	16.0	29.0	3.9	43.0	9.20

Continuación de la Tabla IV.6.

Profundidad cm	Horizonte	CaCO <sub>3</sub> Total %	Yeso %	CIC cmol <sub>c</sub> /kg suelo	Cationes intercambiables, cmol <sub>c</sub> /kg suelo				PSI	Da g/cc
					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>		
					0-20	Ap	10.9	0.95		
20-48/55	A2	14.3	0.50	15.0	2.70	11.5	0.3	0.5	3.3	1.1
48/55-80	Bwk	19.0	1.30	25.0	15.05	9.0	0.35	0.6	2.4	ND
80-102	2Y	0.9	62.9	17.0	8.60	5.2	1.2	2.0	11.8	1.6
<b>Mineralogía, en orden decreciente de concentración relativa, DR-X</b>										
0-20	Ap	Calcita, cuarzo, montmorillonita-15A, feldespato								
48/55-80	Bwk	Calcita, cuarzo, montmorillonita, cristobalita‡, feldespato‡ y yeso‡								

‡ Mineral en muy baja proporción en relación al resto de los minerales. ND = No determinada

### P13.C. Descripción micromorfológica.

**P13.C.1. Microestructura.** El primer horizonte tiene pedialidad buena y consiste en bloques subangulares acomodados, los de tamaño menor a 4 mm con cierta horizontalidad, con tamaño de 0.1 a 12 mm, los más pequeños no están acomodados, ambos de paredes lisas, en términos generales se considera como estructura de bloques subangulares laminares. En el segundo horizonte la pedialidad está bien desarrollada y es en bloques subangulares parcialmente acomodados, de 0.1 a 3.2 cm, los bloques están conformados por agregados granulares de tamaño 0.05 a 1.0 mm sin acomodar, ambos de paredes lisas.

En el tercer horizonte la pedialidad buena. La estructura es granular esponjosa con bioporos, conformada por agregados básicamente de dos tamaños que van de 0.4 a 2.0 mm y < 0.4 mm sin acomodar; hay otros agregados muy pequeños (0.07-0.18 mm) redondeados por lo que pueden ser de origen animal. El cuarto horizonte tiene débil pedialidad y corresponde a estructura de bloques subangulares parcialmente acomodados de hasta 4 cm de diámetro.

**P13.C.2. Huecos.** En el primer horizonte la porosidad es del 40 %. El 10 % son fisuras de 0.05 a 0.6 mm; el 6 % son fisuras horizontales intra-agregados, (Figuras IV.73 y IV.74); < a 40 µm; el 10 % son canales de tamaño 0.15 a 2.5 mm; el 4 % son cámaras de 1.7 a 6 mm; el 10 % son vesículas intra-agregados, de 0.03 a 0.3 mm; todos los poros

son de paredes lisas; la microestructura corresponde a bloques subangulares laminares, porosos. Algunos bioporos están fragmentados (Figura IV.75).

En el segundo horizonte la porosidad es del 35 %. El 10 % son fisuras de 0.02 a 0.6 mm; el 10 % corresponde a canales principalmente de fauna, con tamaño de 0.25 a 1.2 mm, el 8 % son poros de empaquetamiento simple de 25 a 90  $\mu\text{m}$ ; el 5 % son cámaras de 0.5 a 2 mm y el 2 % corresponde a vesículas intra-agregados con tamaño de 0.1 a 2 mm. Todos los huecos tienen paredes lisas. La microestructura es de bloques subangulares con bioporos.

En el tercer horizonte la porosidad es del 40 %. Predominan los poros de empaquetamiento compuesto (0.02- 0.09 mm) con el 20 %; los canales (0.25-2.5 mm) conforman el 8 %; las vesículas (0.025-0.11 mm) el 6 %; las cámaras (1-3 mm) el 3 % y las fisuras ( $< 20 \mu\text{m}$ ) el 3 %; todos los huecos tienen paredes lisas; la microestructura es esponjosa con bioporos. En el cuarto horizonte la porosidad es del 20 %. El 7 % son fisuras con tamaño de 0.035 a 0.4 mm; el 5 % son cámaras (0.1-1.0 cm); el 5 % son canales (0.4-3.0 mm); las vesículas (0.1-1.2 mm) constituyen el 3 % de los poros. Las paredes de los huecos son rugosas o serradas. La microestructura es de bloques subangulares con bioporos.

**P13.C.3. Componentes orgánicos.** En el primer horizonte son abundantes las raíces (0.05-1.8 mm) de color amarillento a pardo oscuro en LPP, birrefringentes, la estructura celular se aprecia sin problema; son frecuentes los restos orgánicos anhistos pardos circulares o semicirculares (30-65  $\mu\text{m}$ ) no birrefringentes; son raras las hifas de color morado-rojizo en LPP de tamaño menor a 20  $\mu\text{m}$ , asociadas a las raíces; también existen bioclastos calcificados (60  $\mu\text{m}$ ).

En el segundo horizonte son frecuentes las raíces (90 – 160  $\mu\text{m}$ ) de color pardo amarillento en LPP, birrefringentes; son raros los componentes orgánicos anhistos circulares ( $< 20 - 65 \mu\text{m}$ ) de color pardo rojizo en LPP; son muy raras las hifas de color pardo oscuro.

En el tercer horizonte son raras las raíces de 90 a 150  $\mu\text{m}$  de tamaño, de color pardo en LPP, algunas birrefringentes; son raros los componentes orgánicos anhistos pardos de 50  $\mu\text{m}$  de diámetro y rojos en LPP y LPC pequeños. En el último horizonte son raras las raíces de color pardo rojizo en LPP, no birrefringentes, son de 100-150  $\mu\text{m}$  de diámetro y no se aprecia la estructura celular, solamente la corteza. En una raíz redonda calcificada (140  $\mu\text{m}$ ) se aprecian varias capas de células en forma arqueada, dándole al fantasma de la raíz un aspecto general ondulado uniforme, se encuentra con excretas de oribátidos de 40  $\mu\text{m}$  (Figuras IV.76 y IV.77); existen componentes orgánicos anhistos menores a 10  $\mu\text{m}$  de color rojo en LPP y LPC. Hay un agregado botroidal en forma de arco constituido por esporas con tamaño menor a 5  $\mu\text{m}$ . En algunas áreas descarboxiladas hay diatomeas de tamaño 10x30  $\mu\text{m}$  (Figuras IV.78 y IV.79).

#### **P13.C.4. Masa basal**

**P13.C.4.1. Material grueso.** En el primer horizonte la relación grueso/fino es 1/9. El principal minerales es la calcita (4 %, 25 a 300  $\mu\text{m}$ ), es rara la calcita rómbica con colores de tercer orden; cuarzo (2 %, 20 – 60  $\mu\text{m}$ ) es límpido; también se tienen máficos (2 %, < 30  $\mu\text{m}$ ), feldespatos (1 %, 40-150  $\mu\text{m}$ ) alteración lineal cruzada, color de tercer orden (Figuras IV.80 y IV.81); es muy rara ( $\ll$  1 %) la whewelita en células conservando su forma, son de color de segundo orden (Figuras IV.82 y IV.83), tamaño menor a 10  $\mu\text{m}$ ; son muy raros (< 1 %) los granos de yeso lenticular euhedral de tamaño menor a 70  $\mu\text{m}$ . La distribución relativa g/f es porfírica abierta.

En el segundo horizonte la relación grueso/fino es de 1/9. La calcita constituye el 5 % con tamaño entre 20 y 55  $\mu\text{m}$ , con clasificación regular, sin alterar, el 1 % corresponde a esparita iridiscente y de tamaño menor a 30  $\mu\text{m}$ ; el cuarzo constituye el 2 % y su tamaño varía de 20 a 150  $\mu\text{m}$  de aspecto límpido; el 1 % son minerales máficos y su tamaño es de 20 a 35  $\mu\text{m}$ ; los feldespatos son muy raros ( $\ll$  1 %) de 75  $\mu\text{m}$ ; también son muy raros ( $\ll$  1 %) los minerales de color marrón, birrefringentes, pleocroicos y de alto relieve, correspondientes a biotita (Figuras IV.84 y IV.85); algunos elementos son alargados isótropos, sin pleocroismo, el porcentaje es  $\ll$  1%, correspondiendo a fitolitos ovalados, esféricos y alargados. La distribución relativa g/f es porfírica abierta.

En el tercer horizonte la relación grueso/fino es de 1/9. La calcita representa el 2 % con tamaño de 30 a 50  $\mu\text{m}$ , la esparita constituye el 4 % y tamaño es de 20 a 40  $\mu\text{m}$ ; el cuarzo límpido conforma el 2 % y su tamaño varía de 20 a 65  $\mu\text{m}$ ; los minerales máficos son el 1 %; los feldespatos son muy raros ( $\ll 1\%$ ) y tamaño de 20 a 60  $\mu\text{m}$ . La distribución relativa g/f es porfírica abierta.

En el cuarto horizonte la relación grueso/fino es de 3/2. Constituida principalmente por yeso lenticular idiotópico (35 %, 20-400  $\mu\text{m}$ ) con líneas de polvo horizontales, con acreciones lenticulares que le dan un aspecto serrado (Figuras IV.86 y IV.87), los más pequeños rodean a los más grandes o a huecos en forma paralela (Figuras IV.76 y IV.77); el yeso lenticular con macla en punta de flecha constituye el 14 % (50-60  $\mu\text{m}$ ) y alrededor del 10 % (0.2-0.9 mm) corresponde a yeso lenticular hipidiotópico con líneas de polvo horizontales que le dan un aspecto de “tablas”, algunos fragmentados, de color gris, los granos de yeso más grandes presentan líneas de polvo en ángulo constituidas por microesparita (Figura IV.86 y IV.87); los feldespatos también están presentes aunque en un bajo porcentaje (1 %) y tamaño aproximado a 25  $\mu\text{m}$ . La distribución relativa g/f va de porfírica cerrada a espacio simple.

**P13.C.4.2. Material fino.** En los tres primeros horizontes la micromasa es de color pardo en LPP, punteada; el color de interferencia es gris y está compuesta de microesparita, calcita, cuarzo, la fábrica-b es cristalítica microesparítica. En el cuarto horizonte la micromasa es de color pardo, compuesta de yeso microcristalino y microesparita dispersa, la fábrica-b es microgípsica con microesparita.

### **P13.C.5. Edaforrasgos**

**P13.C.5.1 Revestimientos.** En el primer horizonte son abundantes los hiporrevestimientos limo-carbonáticos en huecos, principalmente en cámaras y canales correspondiendo a líneas de presión; son frecuentes los revestimientos típicos, birrefringentes, presente en poros, agregados y cristales correspondientes a microesparita; son frecuentes los hiporrevestimientos de empobrecimiento de calcio con o sin relación a huecos y raíces, de color pardo en LPP y gris en LPC, con fábrica-b grano estriada; son frecuentes los revestimientos típicos de materia orgánica en huecos, en agregados y en cristales.

En el segundo horizonte son raros los revestimientos típicos de materia orgánica (< 20  $\mu\text{m}$ ) en huecos y en minerales; son frecuentes los revestimientos típicos y raros los hiporrevestimientos de microesparita con un grosor < 20  $\mu\text{m}$ , presentes en áreas con o sin descalcificación; son frecuentes los hiporrevestimientos de empobrecimiento con fábrica granoestriada o estriada paralela; son frecuentes los hiporrevestimientos limo carbonático de 20-100  $\mu\text{m}$  de espesor, no birrefringentes, considerados línea de presión; son frecuentes las líneas de presión arcillosas de color amarillo en LPP y en LPC, birrefringentes inmersas en agregados deformados y traslocados posiblemente por mesofauna (Figuras IV.86 y IV.91), son más importantes que en el primer horizonte. Son frecuentes hiporrevestimientos de empobrecimiento de tamaño de 0.125 a 0.9 mm con fábrica granoestriada, y componentes orgánicos y esparíticos mezclados.

En el tercer horizonte son frecuentes los hiporrevestimientos de empobrecimiento con fábrica granoestriada o estriada paralela; son abundantes las líneas de presión arcillosas dentro de agregados, asociados a cámaras de 6 mm de diámetro; son frecuentes los revestimientos típicos de microesparita con espesor de 20 a 30  $\mu\text{m}$  en huecos; son raros los revestimientos típicos de materia orgánica sobre agregados y cristales y algunos.

En el cuarto horizonte hay revestimientos típicos e hiporrevestimientos en huecos, de color pardo amarillento en LPP y amarillo en LPC, birrefringentes, de naturaleza arcillo limosa, tamaño menor a 30  $\mu\text{m}$ ; son raros los revestimientos típicos de microesparita o micrita sobre los granos de yeso más grandes, formando líneas de polvo horizontales y algunas veces en forma angular (Figuras IV.92 y IV.93); algunos granos de yeso presentan manto fúngico a manera de revestimiento (Figuras IV.94 y IV.95).

**P13.C.5.2. Rellenos.** En el primer horizonte son frecuentes los rellenos suelto discontinuo en cámaras de hasta 6 mm, con material de masa basal, y las más grandes con componentes orgánicos anhistos rojos en LPP, raíces y excretas de oribátidos; son frecuentes los rellenos denso incompleto en canales, constituidos por masa basal; son raros los rellenos suelto discontinuo, por microesparita presente en zonas con o sin descarbonatación; en ellas se presentan componentes orgánicos anhistos, o posibles excretas de oribátidos, rojos en LPP y en LPC < 20  $\mu\text{m}$ .

En el segundo horizonte son raros los rellenos densos incompletos (150  $\mu\text{m}$ ) por microesparita; los rellenos denso incompleto o suelto discontinuo de tamaño variado 0.4-1.0 mm corresponde a canales y cámaras rellenas con masa basal con o sin agregados subredondeados (45-60  $\mu\text{m}$ ) considerados de origen animal.

En el tercer horizonte hay una cámara de 5 mm de diámetro con relleno suelto discontinuo, por agregados subredondeados de tamaño 0.4 a 0.8 mm, posiblemente de origen animal; hay una cámara de 6 mm con relleno suelto continuo, constituidos por agregados de masa basal y otros esféricos de 0.2 a 0.4 mm correspondiendo a excretas; son frecuentes los canales con relleno suelto discontinuo, conformados por masa basal; un canal tiene relleno suelto discontinuo, con masa basal, raíces y excretas de unos 50  $\mu\text{m}$ .

En el cuarto horizonte son abundantes los rellenos densos completos de yeso lenticular equigranular idiotópico; cámara de 1 cm rellena con agregados limo arcillosos (Figuras IV.96 y IV.97), fábrica grano estriada o estriada cruzada o paralela, de color pardo en LPP y grisáceo en LPC; hay un canal con relleno denso completo curvado, por lo que se deduce su origen animal.

**P13.C.5.3. Nódulos.** En el primer horizonte son raros los nódulos órticos típicos y geódicos cuyo tamaño varía de 0.045 a 1.1 mm de composición carbonática; se presentan en grietas, inmersos en la masa basal o en zonas de descarbonatación, son birrefringentes y su fábrica-b interna es cristalítica microesparítica. Son raros los nódulos mediana a fuertemente impregnativos de materia orgánica.

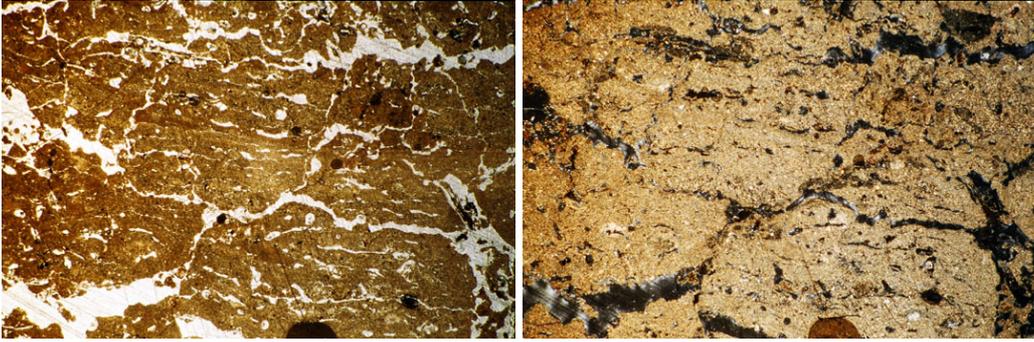
En el segundo horizonte son raros los nódulos órticos típicos densos, y geódicos constituidos por microesparita y tamaño de 30 – 45  $\mu\text{m}$ ; otros son órticos típicos, agrupados o aislados, moderadamente impregnativos, tamaño 25-30  $\mu\text{m}$  conformados por materia orgánica. Son abundantes los agregados a manera de nódulo con pequeñas bandas birrefringentes de color amarillo en luz polarizada plana y cruzada, correspondiendo a agregados limo-arcillosos, traslocados o no (Figuras IV.86 a IV.91).

En el tercer horizonte son raros los nódulos órticos típicos de calcita microesparítica con tamaño aproximado de 75  $\mu\text{m}$ ; son frecuentes los nódulos fuertemente impregnativos conformados por materia orgánica, de color pardo oscuro, amorfo y tamaño de 90  $\mu\text{m}$ . Hay nódulos con fábrica-b estriada paralela, similares a los de los anteriores horizontes.

En el cuarto horizonte son abundantes los nódulos órticos típicos de yeso lenticular idiomórfico equigranular (tamaño del grano de 35  $\mu\text{m}$ ); son frecuentes los nódulos órticos típicos de yeso xenomórfico; se tienen abundantes islas limo arcillosas, principalmente en fisuras y canales (Figuras IV.96 y IV.97).

**P13.C.6. Excrementos.** En el primer horizonte son abundantes los excrementos de 25 a 35  $\mu\text{m}$  de forma esferoidal, de color pardo oscuro, rojizo o pardo amarillento, asociados a restos orgánicos, correspondiendo a oribátidos; son raros los excrementos esféricos u ovalados de 0.5 a 0.8 mm, de color pardo amarillento en LPP, composición muy similar a la masa basal, posiblemente correspondan a *Adelidae* o *Bibionidae* (Bullock *et al.*, 1985). En el segundo horizonte son abundantes las deyecciones de 25 a 35  $\mu\text{m}$  de tamaño, de forma esferoidal, de color pardo oscuro o pardo amarillento, correspondiendo a oribátidos, son frecuentes los excrementos de 45 a 60  $\mu\text{m}$ , de composición similar a la masa basal, esféricos, posiblemente sean de larvas de *Adelidae* o *Bibionidae*. Son raros los excrementos cilíndricos de 110  $\mu\text{m}$ , pardos, sin alterar, fábrica grano estriada, posiblemente sean de larvas de *Lymnophilidae*.

En el tercer horizonte son frecuentes los excrementos de oribátidos de color pardo amarillento a pardo oscuro, de 55  $\mu\text{m}$ ; son frecuentes los excrementos de forma cilíndrica, tamaño 75-150  $\mu\text{m}$  de diámetro, de color pardo, sin alterar o coalescentes, de fábrica-b grano estriada y posiblemente correspondan a larvas de *Lymnophilidae*. En el cuarto horizonte además de excrementos ocasionales de oribátidos y *Lymnophilidae*, también se tiene evidencias de actividad de lombrices, lo cual se detecta por el acomodo arqueado de los cristales de yeso lenticular y material basal disperso a lo largo de un canal de 4 mm de ancho, asimismo se tienen excrementos mamilados de 0.5 mm de diámetro.



Figuras IV.73, LPP y IV.74, LPC. Bloques subangulares parcialmente acomodados con huecos fisura-vesículas horizontales intra-agregado. Lado menor 4.5 mm.

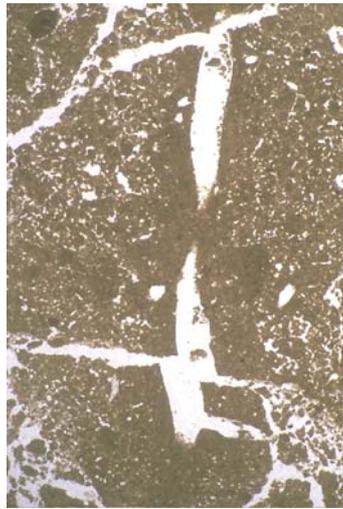
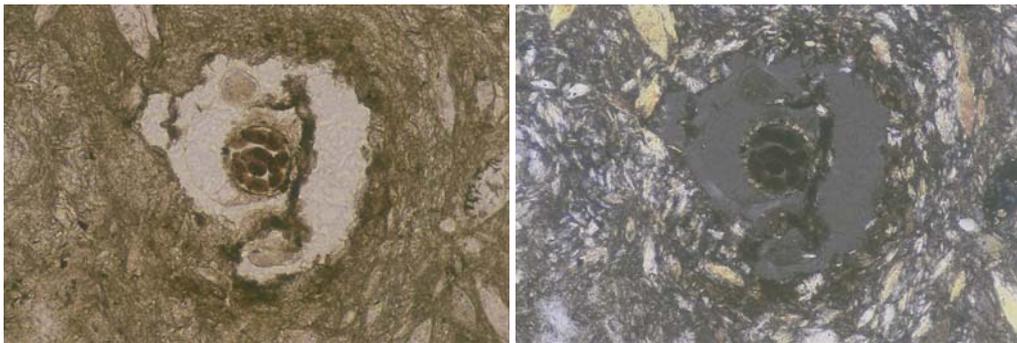
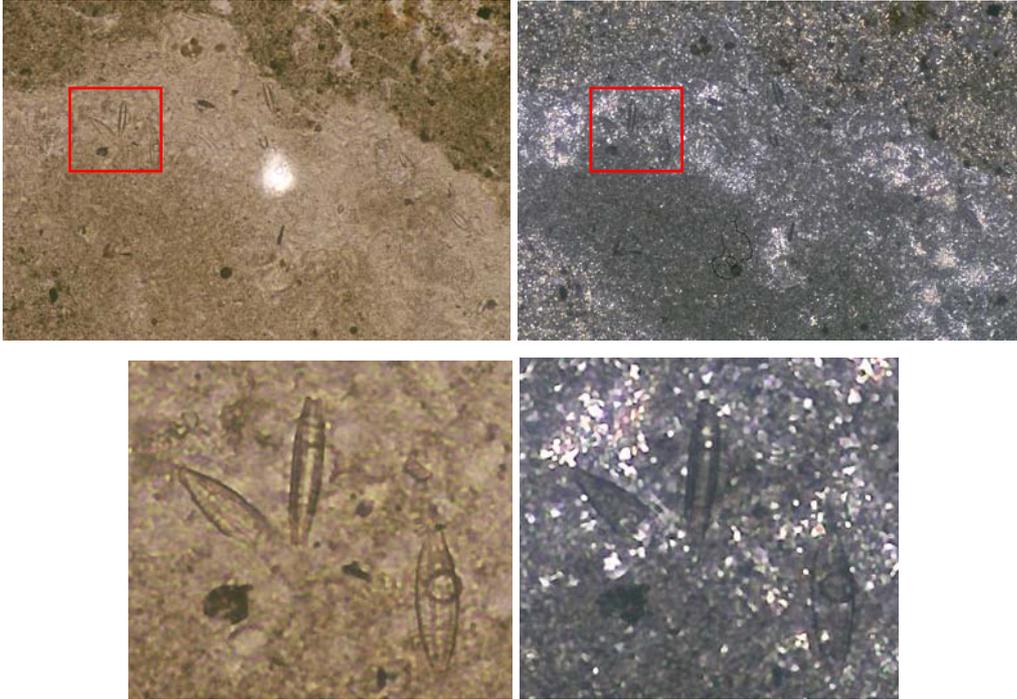


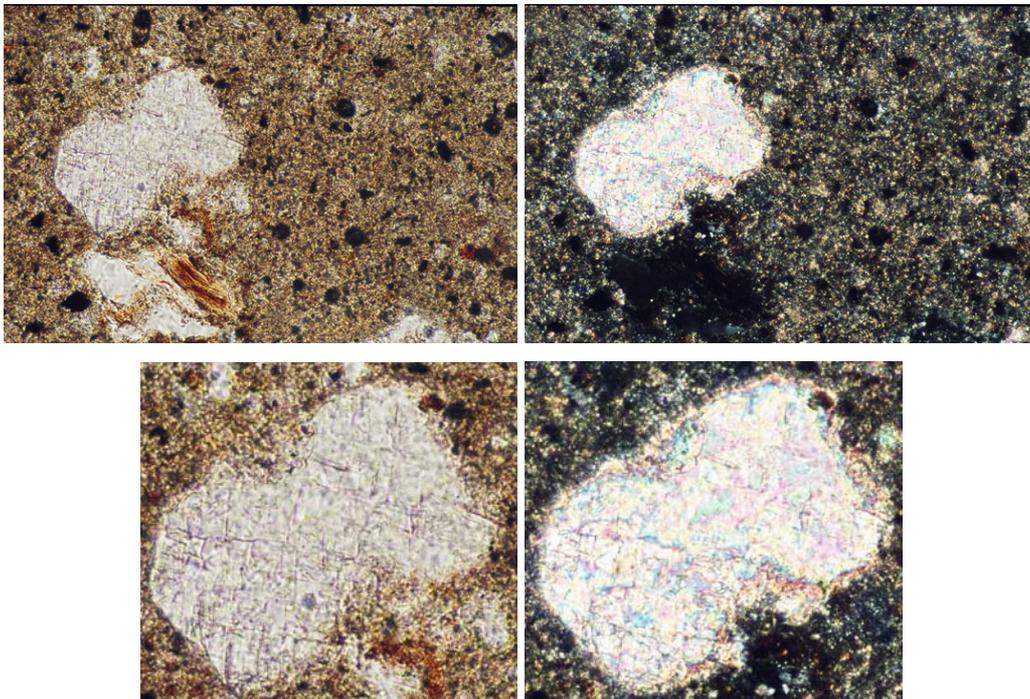
Figura IV.75, LPP. Canal con línea de presión, hiporrevestimiento limo carbonático, fragmentado por edafoturbación. Lado mayor 6.8 mm.



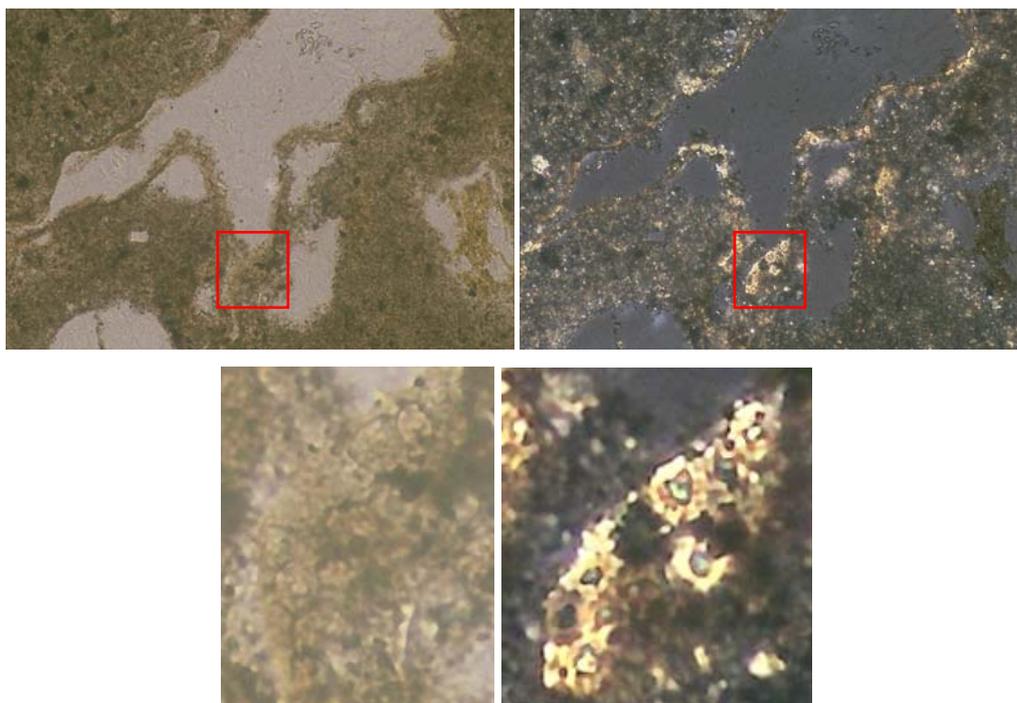
Figuras IV.76, LPP y IV.77, LPC. Raíz con excretas de oribátidos. Yeso lenticular euhedral con fuerte orientación paralela al bioporo, los granos más grandes presentan acreciones. Revestimientos de micrita. P13: 80-90 cm. Lado mayor 1.09 mm.



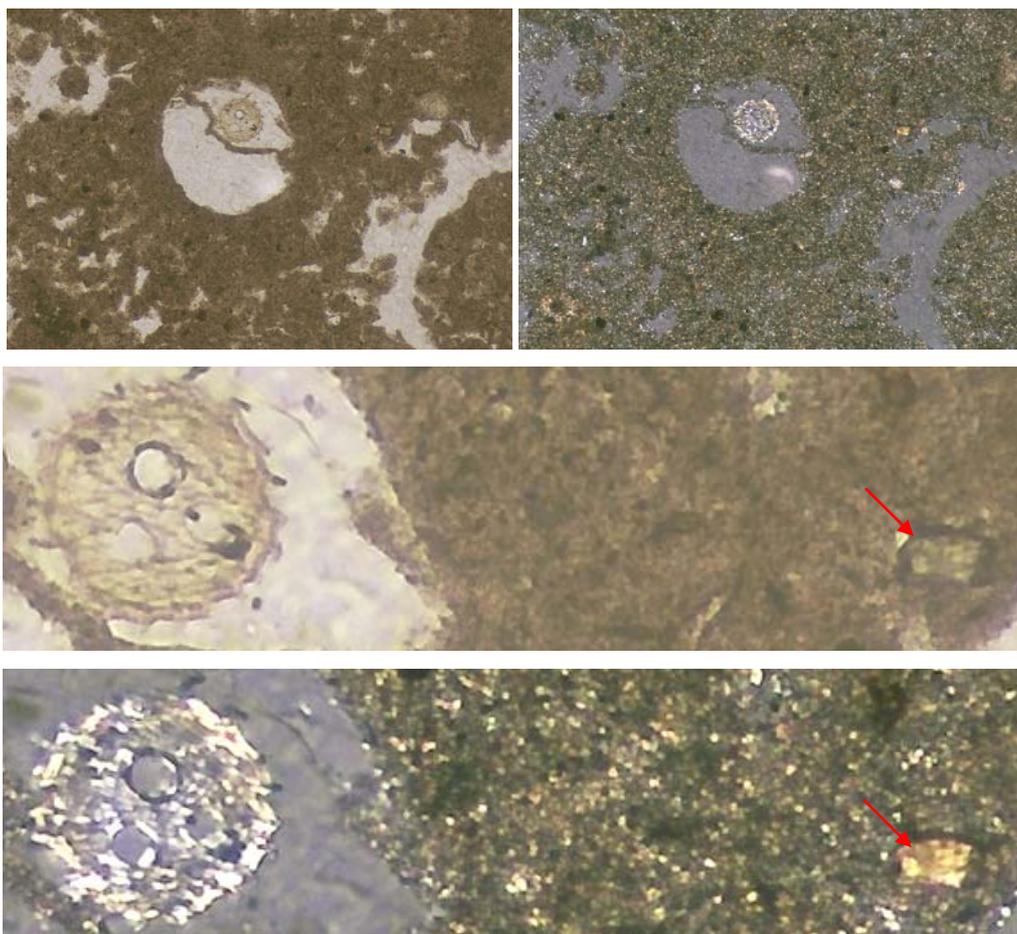
Figuras IV.78, LPP y IV.79, LPC. Diatomeas en zona de decarbonatación. Lado mayor del primer par de Figuras 0.55 mm, las otras dos son acercamientos.



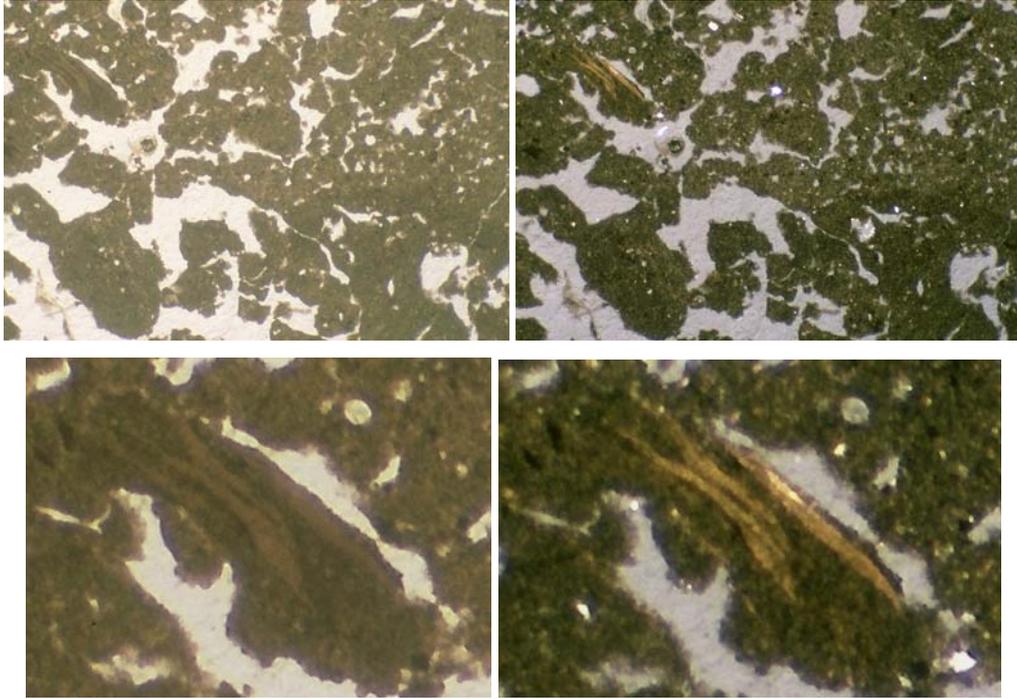
Figuras IV.80, LPP y IV.81, LPC. Feldespato con alteración lineal cruzada. Lado mayor del primer par de Figuras 0.55 mm.



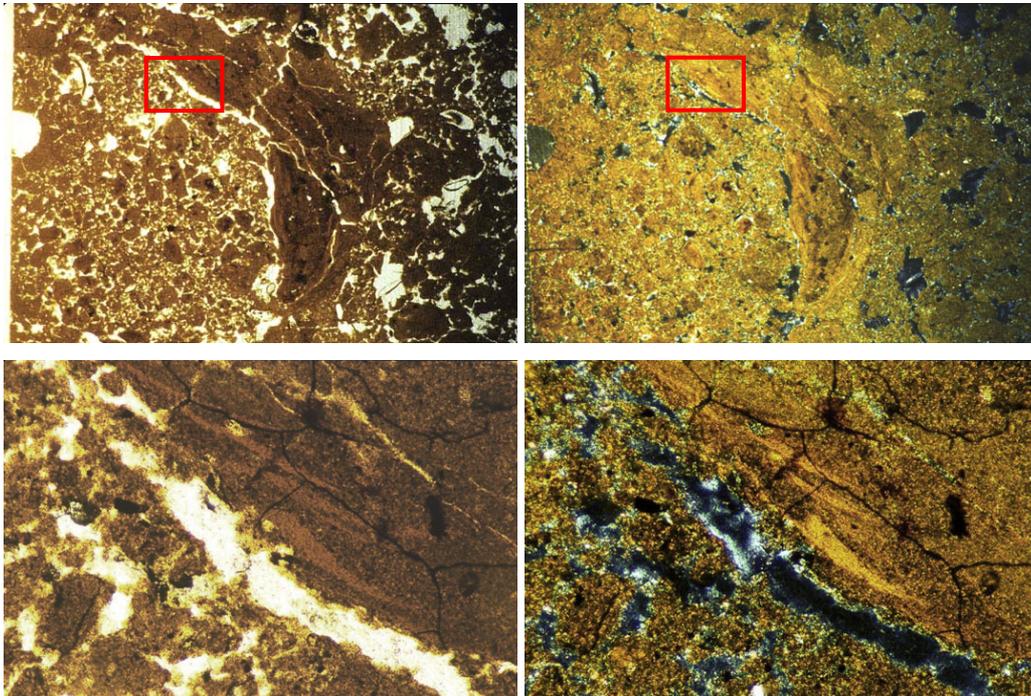
Figuras IV.82, LPP y IV.83, LPC. Oxalato de calcio, posiblemente whewelita, asociado a restos orgánicos, posiblemente se trate micelio hialino. Lado mayor 0.55 mm.



Figuras IV.84, LPP y IV.85, LPC. Raíz activa y biotita birrefringente y pleocroica, pardo. Lado mayor 1.09 mm.



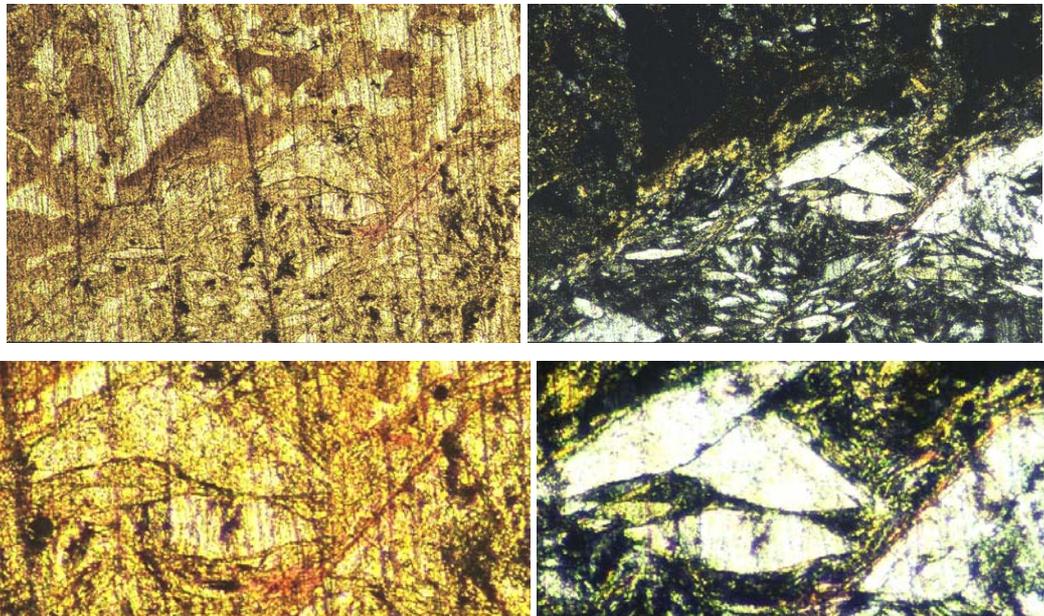
Figuras IV.86, LPP y IV.87, LPC. Agregado (o dominio) con bandas arcillosas paralelas birrefringentes, disórticos, posiblemente corresponda a fragmentos de pasaje de fauna translocados. Lado mayor 3.4 mm.



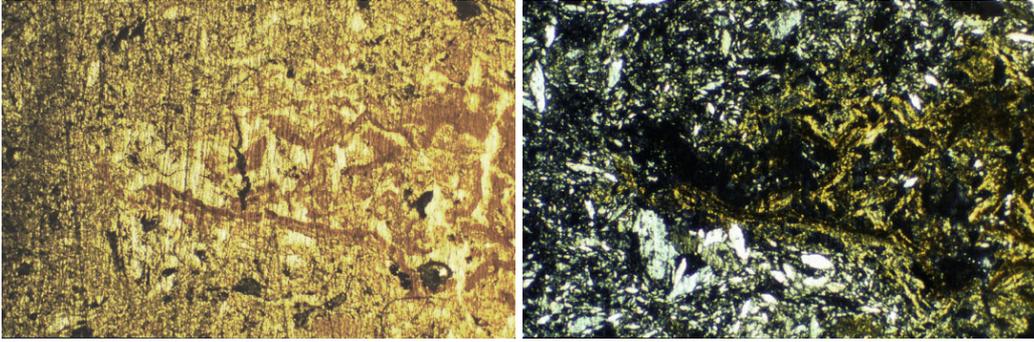
Figuras IV.88, LPP a IV.91, LPC. Relleno con agregados y bandas arcillosas birrefringentes, corresponden a líneas de presión originadas por la mesofauna. Por la naturaleza laminar de la montmorillonita con la presión tiende a orientarse en forma paralela. Lado mayor del primer par 6.8 y del segundo 1.09 mm.



Figuras IV.92, LPP y IV.93, LPC. Yeso lenticular con acreciones por los extremos y que le dan aspecto serrado o dentado, con líneas de polvo carbonatadas angulares y revestimientos de micrita y granos de microesparita aislados. Fábrica-b microgíptica. Lado mayor 3.4 mm.



Figuras IV.94, LPP y IV.95, LPC. Granos de yeso disociados o en proceso de fragmentación, con inclusiones carbonatadas y acumulaciones limo arcillosas, fábrica-b grano estriada. Manto fúngico sobre agregados y granos de yeso. Lado mayor 1.09 mm.



Figuras IV.96, LPP y IV.97, LPC. Cámara con agregados con revestimientos birrefringentes amarillos en LPP y LPC, fragmentados y o translocados, el soporte es yeso lenticular. Lado mayor 6.8 mm.

#### **D. Interpretación.**

Estos dos perfiles (P10 y P13) presentan rasgos muy interesantes desde el punto de vista edáfico y por ello es necesario analizar, por ejemplo la existencia de whewelita, de esferulitas, áreas de descarbonatación o hiporrevestimientos de empobrecimiento, líneas de presión y revestimientos arcillosos en horizonte hipergípsico. Estos aspectos se estudian con más detenimiento.

En cuanto a los **análisis fisicoquímicos**, el perfil P10 contiene casi el doble de  $\text{CaCO}_3$  equivalente en todo el perfil en comparación al P13. En ambos perfiles el yeso en cantidad importante como para reunir el requisito de horizonte gípsico se presenta a partir del tercer horizonte, y es 10 % más alto en P13. Este es más rico en materia orgánica y su contenido desciende en forma gradual con la profundidad, lo cual no sucede en P10, pero en ambos se mantiene mayor al 1 %, es decir el contenido de carbono orgánico (0.5 %) es mayor al 0.2 % hasta los 100 cm, mínimo necesario para considerarlo como material diagnóstico flúvico (WRB, 1999). El P13 es más salino y en el horizonte yesoso la diferencia es mayor 7.3 dS/m contra 1.9 dS/m de P10.

**Revestimientos arcillosos y líneas de presión.** Ambos sitios son arcillosos aunque P10 lo es un poco más. Sin embargo el horizonte yesoso de P13 tiene 5 % de arcilla y el P10 solamente 2 %, estas diferencias también se aprecian en las secciones delgadas. En el Perfil P10 no hay revestimientos arcillosos. En cambio en el P13 hay en huecos fisura y cámaras, y sobre granos de yeso, rasgos que en algunos casos se pueden confundir con revestimientos arcillosos iluviales debido a su birrefringencia, indicativo de arcilla con orientación paralela. En una de las cámaras se presentan agregados a manera de relleno suelto discontinuo, fragmentados posiblemente por el movimiento ocasionado por el proceso de disolución y recristalización del yeso (Figuras IV.96 y IV.97). Sin embargo esta arcilla por las varias razones es sedimentaria y no iluvial.

Para que se presente la iluviación de arcilla primero se tiene que dispersar y después ser transportada por el agua de gravedad a horizontes más profundos. La dispersión de las arcillas depende de varios factores, tales como el tipo y tamaño del mineral de arcilla, pH, materia orgánica, tipo de cationes y concentración de electrolitos (Dorransoro y Aguilar, 1988). Posiblemente el tipo de arcilla presente en el suelo P13, y tal vez también en el P10, es la montmorillonita dado que en los dos horizontes superiores se

identificó esta arcilla por análisis por DR-X (Tabla IV.7). La montmorillonita tiene una alta capacidad de intercambio catiónico ( $80$  a  $150 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ , Porta *et al.*, 2003) y a mayor capacidad de cambio mayor estabilidad (Dorronsoro y Aguilar, 1988).

El calcio y el magnesio sin sodio a pH mayor a 7 ocasionan floculación de la arcilla evitando su dispersión y en estos suelos el contenido de carbonato de calcio es superior al 16 % en P10 y mayor a 10 % en P13, cantidades que pueden ser suficientes para flocular la arcilla evitando su iluviación. No obstante se ha reportado iluviación de arcilla en suelos carbonatados. Wieder y Yaalon (1978) admiten que la migración de arcilla en suelos calcáreos es posible cuando la concentración de iones calcio es baja, durante las primeras etapas de humedecimiento, antes del equilibrio con la calcita. Goss *et al.* (1973) al hacer percolar libremente arcilla en suelo con carbonatos de calcio del orden del 40 %, demuestran que más de la mitad de la arcilla emigra a profundidad superior a los 40 cm, sin embargo ellos parten de una arcilla previamente dispersada.

Con datos de las estaciones meteorológicas El Tepeyac distante 11 km al noroeste de P10 y El Salado distante 8.5 km al norte de P13 (CNA, 2000) la precipitación media anual es de 325 y de 380 mm, respectivamente. La insignificancia de la lluvia se considera como otra posible razón por la que no haya horizonte argílico, esta agua puede ser insuficiente para traslocar la arcilla a un horizonte inferior. Asimismo, en suelos arcillosos es difícil o incluso imposible identificar los revestimientos de arcilla tanto en campo como en laboratorio, debido a que hay poco contraste textural, y aunque se pudieran estar formando revestimientos de arcilla estos tienen vida muy corta debido a su fácil destrucción por el dinamismo de las arcillas expandibles (Dorronsoro y Aguilar, 1988), como la montmorillonita encontrada en P13.

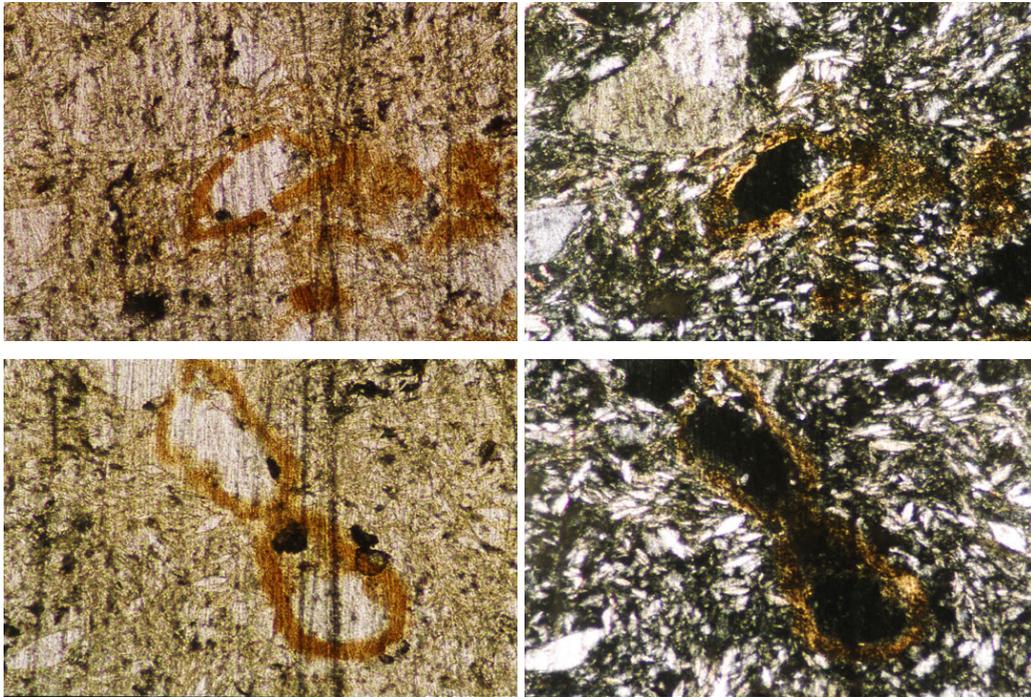
Es muy frecuente la dificultad de identificar la arcilla iluvial en suelos arcillosos. Por ejemplo, orientación de arcilla debida a la presión o estrés por procesos de contracción y expansión de las propias arcillas o por las raíces y fauna del suelo (Figuras IV.58, IV.68 y IV.86 a IV.91). Ello acentuado por el clima árido con periodos secos y húmedos marcados. En P10 es muy probable que la arcilla sea montmorillonita debido a que el material del suelo, al igual que el del P13, proviene de calizas arcillosas (García, 1968, 1978; CRM, 1992, 1996), y también porque se presentan en otro perfil arcilloso (el P5) analizado posteriormente.

En horizontes yesosos es difícil que haya revestimientos de arcilla iluvial por varias razones. Tal vez la causa principal es el dinamismo de estos horizontes debido a los procesos de disolución-recristalización del yeso, que fragmenta, dispersando los revestimientos, o los mezcla con matriz del suelo (Khademi y Mermut, 2003). La cristalización de carbonatos también puede contribuir de manera importante en la fragmentación de los revestimientos de arcilla iluvial (Gile y Grossman, 1968). Los revestimientos de arcilla de estar presentes se pueden confundir con líneas de presión, debido a que la presión ejercida por el proceso de cristalización del yeso origina orientación de las arcillas. Sin embargo Benayas *et al.* (1988) reportan revestimientos de arcilla en un horizonte yesoso profundo pero sin dar más datos.

En las Figuras IV.100 a IV.103 se observan revestimientos no lípidos característicos de la arcilla sedimentaria, por estar mezclados con materiales limosos, algunos no presentan birrefringencia y no recubren a los granos de yeso, aunque esto se podría deber al dinamismo del yeso. Además, algunas cámaras o fisuras tienen islas limo arcillosas con fábrica-b estriada paralela o cruzada, y probablemente son debidas a la presión de cristalización del yeso. La acción del yeso se constata por la presencia de cristales de yeso lenticular intercalar (Herrero, 1991) en algunas islas, así como por la distribución inequigranular del yeso con granos pequeños paralelos a los más grandes y a huecos, indicativo de disolución – recristalización y por lo tanto de su dinamismo. Por todo ello los revestimientos del perfil P13 no son iluviales, considerándose sedimentarios, otros pueden ser líneas de presión y son resultado de la actividad de mesofauna cuyo paso genera presión y orienta a la montmorillonita (identificada por DR-X) y posteriormente se fragmentan y translocan. Algunos son islas con dominios de arcilla orientada posiblemente por la presión de cristalización del yeso, y con descalcificación.

En algunos casos se presentan acumulación limoarcillosa lo cual pudiera indicar que el proceso de disolución-recristalización del yeso no es muy acusado o que no es muy dinámico posiblemente por falta de agua, o que los procesos de humectación-secado no lleguen hasta este horizonte. Estos rasgos se tienen en la zona de transición entre el horizonte sin yeso (1.3 %) y con más arcilla (28.2 %) con el horizonte hipergíptico (62.9 %) y poca arcilla (5 %), por lo que pudiera tratarse de mezcla de material limoarcilloso con el yeso, o acumulación sedimentaria. Asimismo se podría pensar la

acumulación limo arcillosa no fragmentada presente en huecos como los de las Figuras IV.100 a IV.103 es más recientes que los ya fragmentados (Figuras IV.96 y IV.97).



Figuras IV.100, LPP a IV.103, LPC. Acumulación limo arcillosa. Lado mayor 6.8 mm.

En el perfil P10 es acentuada la disminución de arcilla con la profundidad, en el horizonte superior es de 47.7 % y en el tercero de 39 %. En el perfil P13 hay un ligero incremento de arcilla en el segundo horizonte respecto al primero, aunque es bajo 2.6 % y no cumple para argílico. Ambos son suelos jóvenes, aunque el perfil P13 está ligeramente más desarrollado, posiblemente debido a periodos de mayor estabilidad. El sitio de P10 recibe más a menudo materiales finos debido a que se inunda con más frecuencia, pudiendo ser cada año según el dueño de la parcela donde se ubica la calicata. En las áreas con inundación periódica y por pocos días, en el sitio P10, se establece la planta denominada localmente “lagunera” considerándose como indicativo de inundación, se constató su presencia en el sitio P10 y en San Isidro, Villa Juárez (P5), mas no en San Vicente. Sin embargo queda la duda si dicha especie solamente es de distribución regional, y los pediones P10 y P13 distan entre sí por más de 200 km.

**Oxalato de calcio.** En los dos perfiles, y sobre todo el 10, se encontró oxalato de calcio, posiblemente corresponde a whewelita ( $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , Figuras IV.55 a IV.58) siempre asociada a restos orgánicos flobafenizados o incluso sobre posibles restos de ostrácodos.

La whewelita se forma al reaccionar el ácido oxálico secretado por los organismos con el calcio aprovechable en el ambiente. Este mineral ha sido reportado por varios autores (Wadsten y Moberg, 1985; Herrero, 1991; Russ *et al.*, 1995, 1996; Oyarbide *et al.*, 2001; Monje y Baran, 2002). Russ *et al.* (1996) la encuentran como componente principal de una costra (aproximadamente de 1  $\mu\text{m}$ ) y en forma secundaria asociada a yeso tabular, Suroeste de Texas, USA, en condiciones secas.

La biomineralización puede ocurrir durante el crecimiento vegetativo y degradación de fuentes orgánicas o relacionadas con especies micorrícicas, y las especies que pueden producirlo son los Basidiomicetos, Ascomicetos, hongos del género *Mucor* como *Trichoderma koningii* (Oyarbide *et al.*, 2001), líquen *Aspicilia calcarea* (Russ *et al.*, 1996), hongos y líquenes (Klappa, 1979; Wadsten y Moberg, 1985; Russ *et al.*, 1995), o por plantas superiores (Monje y Baran, 2002; Oyarbide *et al.*, 2001; Jaillard *et al.*, 1991; Franceschi y Horner, 1980). Asociado a tejidos se presentan manto de hifas que pueden intervenir en la formación de oxalato de calcio presente en dicho tejido (Verrecchia, 1990 y Verrecchia *et al.*, 1990; citados por Russ *et al.*, 1996).

Para Oyarbide *et al.* (2001) y Monje y Baran (2002) la formación de whewelita o de whedelita [ $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot (2+x)\text{H}_2\text{O}$ ] depende de la humedad. Para Monje y Baran (2002) la whedelita es metaestable y por ello menos frecuente, y la encuentran áreas con humedad alta (809 mm de precipitación anual). Russ *et al.* (1996) y Wadsten y Moberg (1985) reportan whewelita en ambientes secos. En el área donde se ubican ambas calicatas, P10 y P13, hay condiciones secas, con precipitación media anual menor a los 400 mm, siendo esta una posible razón por lo que no se ha encontrado whedelita.

Los oxalatos de calcio producidos por las plantas cumplen varias funciones. Así para Monje y Baran (2002) estos minerales están implicados en el balance iónico o regulación interna del pH e iones Ca, en la percepción de la gravedad, funcionan como soporte mecánico, y en las cactáceas preservan el agua manteniendo bajo el nivel de calcio cuando evitando la apertura estomatal, o para también para mantener en un nivel bajo de ácido oxálico soluble el cual es potencialmente tóxico. Para Estébanez *et al.* (2001) actúan como barrera física de la planta evitando la entrada de patógenos, bloqueando las zonas muertas o heridas.

**Esferulitas.** Estos componentes son mucho más abundantes en P10 que en P13. Predominan las radiales (Figuras IV.55 a IV.58) frente a las que presentan interferencia pseudouniaxial y pocas con estructura en “zoning” o zonada (Figuras IV.53 y IV.54). Las esferulitas radiales son del tipo A de Verrecchia *et al.* (1995), redonda y concéntrica. Se les encuentra en costras asociadas a restos orgánicos por lo que se les considera de origen biogénico. Las esferulitas son el resultado de la actividad de cianobacterias o bacterias, y se pueden formar tanto en la superficie del suelo (Verrecchia *et al.*, 1995) como a cierta profundidad (Wright *et al.*, 1996). Para (Mees, 1999) es posible que se presenten en fisuras sub horizontales a manera de relleno, estando relacionadas a la actividad de las raíces y no de los microorganismos.

Las esferulitas son cristales simples (Chafetz y Butler, 1980; Rossi y Cañaveras, 1999) compuestos por calcio y magnesio con predominio del primero en el centro (Verrecchia *et al.*, 1995; Wright *et al.*, 1996; Mees, 1999; Chafetz y Butler, 1980). Rossi y Cañaveras (1999) describen esferulitas compuestas de agregados policristalinos de calcita y no de cristales fibro-radiales terminados en punta (Verrecchia *et al.*, 1995) por lo que las consideran como pseudoesferulitas. Todos los anteriores autores han encontrado a las esferulitas y a las pseudoesferulitas formando costras. Las esferulitas del perfil P10 se localizan en los primeros 3 cm, sin embargo no hay costra. Por la escasa cantidad de esferulitas y el que el suelo sea labrado se consideran como hechos aislados sin relación con formación de costra, pero tampoco se descarta su formación en condiciones sin perturbar.

**Yeso con inclusiones o líneas de polvo, disoluciones o acreciones.**

En los suelos de los pediones P10 y P13 son muy comunes granos de yeso grandes (por lo general mayores a 200  $\mu\text{m}$ ) con inclusiones debidas a la incorporación de material de la masa basal, o inclusión de la solución del suelo durante el proceso de formación del cristal. Las inclusiones pueden estar presentes en forma de líneas o áreas (Porta, 1986), y representan planos de exfoliación o áreas de debilidad por las que se fragmenta el grano (Artieda, 1996). Dichas inclusiones son de micrita y microesparita (Figuras IV.61, IV.62, IV.92, IV.93).

Algunos granos de yeso lenticular grandes ( $\pm 1$  mm) presentan líneas de polvo en ángulo, indicando periodos de crecimiento (Figuras IV.92, IV.93). En otros estudios se

han reportado inclusiones de carbonato (Arricibita *et al.*, 1988; Benayas *et al.* 1988; Porta, 1986), de fluorita ( $F_2Ca$ , Pinilla *et al.*, 1987; citados por Benayas *et al.*, 1988) y de celestina ( $SrSO_4$ , Herrero y Porta, 1987). Las inclusiones en yeso se han estudiado para conocer el origen del fluido que envuelve la precipitación de minerales autógenos, (Toulkeridis *et al.*, 1998; Lu *et al.*, 1997, 2002).

Es común encontrar cristales con formas cuasilenticulares alargados con bordes ondulados debido a desprendimientos longitudinales, generando cristales más pequeños (Artieda, 1996). Algunos cristales con avanzado proceso de disolución miden  $20 \times 300 \mu m$ , es decir son unas 15 veces más largos que anchos cuando sin disolución miden de 3 a 7 veces de largo lo que tienen de ancho. Algo similar sucede con el yeso con macla en punta de flecha o lanza el cual presenta acreciones y o desprendimientos (Figuras IV.63 y IV.64).

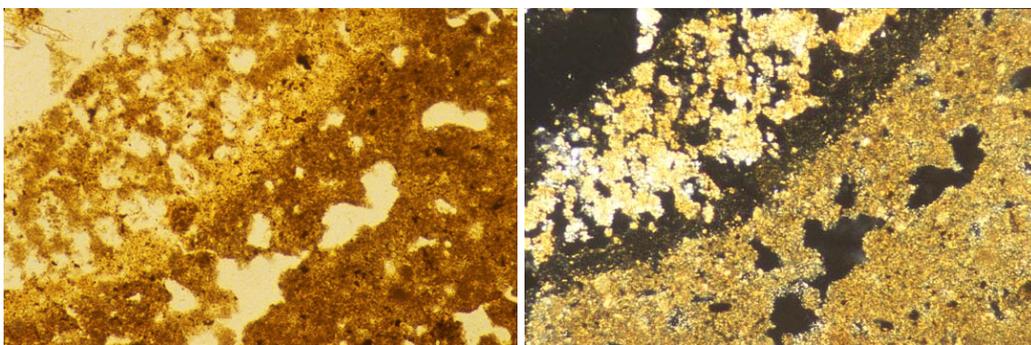
**Descalcificación.** En P10 son más frecuentes las áreas descalcificadas descritas como hiporrevestimientos de empobrecimiento de carbonatos. Estas zonas descalcificadas se ubican en agregados dentro de cámaras o en fisuras con o sin raicillas. En la mayor parte de las áreas empobrecidas se acompañan de recristalización de esparita o pseudoesparita. Este empobrecimiento puede ser ocasionado por el agua de lluvia, cuando no se presentan asociados a raíces, o por la acción directa de la raíz (Herrero, 1991; Artieda, 1996) debido a acidificación del medio.

Las zonas de descalcificación sin presencia de calcita recristalizada se puede deber a que el calcio está siendo lavado y depositado en otras partes del perfil, o que los minerales carbonáticos que se formen son translocados. Algunos agregados empobrecidos e inmersos en la masa basal, pueden corresponder a translocaciones por posible movimiento del material suelo dado el alto contenido de arcilla (39 a 47 %) de los tres primeros horizontes, o por la actividad de la mesofauna y de las plantas. Es frecuente encontrar granos de esparita aislados con la forma alargada o citomorfa comunes en las áreas de descalcificación – precipitación, pero no se consideran parte de una quera porque no se parecen a la quesparita de Herrero (1991).

Son escasas las áreas descalcificadas asociadas a restos de raíces y que coincidan con la formación de calcita, de tal manera que pudieran corresponder a queras descritas por

Herrero y Porta (1987), Herrero (1991) y Artieda (1996). Dichas áreas no se consideran querars debido a que no tienen los componentes típicos, tal como la quedecal o área de empobrecimiento o de descarbonatación con huecos alargados y ondulados con sección circular y posiblemente debidos a pelos radicales (Artieda, 1996; Artieda y Herrero, 2003). Tampoco tienen los granos de quesparita típicos, descritos por Herrero (1991) como granos de calcita citomorfa equigranular bien ensamblados entre sí y con secciones poliédricas de caras curvas. Es decir solamente se consideran como áreas de descalcificación, algunas veces con presencia de raíces, con recristalización de esparítica o pseudoesparita (Figuras IV.69, IV.70, IV.104, y IV.105).

La zona descalcificada tiene fábrica-b estriada, lo cual es típico en las querars aunque no es exclusiva de este edaforrasgo, con recristalización de esparita y esferulitas con color de interferencia pseudouniaxial. Artieda y Herrero (2003) describen la presencia de carbonatos micríticos y microesparíticos como relleno denso incompleto de fisuras, con estructura interna que denominan de “anillos carbonáticos” de 15 a 20  $\mu\text{m}$  de ancho y de 40 a 70  $\mu\text{m}$  de diámetro externo, los cuales con frecuencia coalescen, y también hay yeso lenticular entre los anillos. Algunas áreas carbonatadas (Figuras IV.104 y IV.105) presentan cierto parecido al anterior edaforrasgo, sin embargo son más amorfas a los de los autores citados, tal vez sea una etapa inicial de la formación de anillos carbonáticos. No se descarta la posibilidad de que parte de las áreas carbonatadas en las Fotografías IV.104 y IV.105 sea artefacto del material mezclado con calcita y yeso constituido por resina muy gruesa (Artieda, O. 2005, comunicación personal).



Figuras IV.104, LPP y IV.105, LPC. Áreas de descalcificación con recristalización de carbonatos en forma “semicirculares” y con ligero parecido a los anillos descritos por Artieda y Herrero (2003). P10: 95 – 105 cm. Lado mayor 1.09 mm.

**5.2.3. Suelos en “joya”.** Estos suelos se ubican en las áreas con influencia directa del río Choy y según los dueños de la tierra donde se localiza el pedión P15, hasta hace unos 25 – 30 años aún se anegaba casi todos los años. A la parte baja se le conoce localmente como “joya” y por lo general son alargadas a favor de la pendiente, la cual suele ser menor al 2 %. Por lo general se dedican a la agricultura de temporal (secano). A la parte alta se le denomina “loma” y tiene de 1 a 3 m de altura respecto a la joya (Figuras IV.106 y IV.107). La influencia del río Choy se constata en la estratificación del material suelo de la parte baja (Figura IV.109) y en los análisis fisicoquímicos respectivos. Dicha estratificación se aprecia incluso en la parte alta, tal como se ve en un pozo existente en la “loma” colindante al Pedión P15 (Figura IV.110). Por lo tanto esta geoforma es diferente a las áreas de los pediones P9 y P12, en las que no se tienen estratificación. El Pedión P15 se ubica cercano al Panteón, en terrenos de Progreso, Rioverde, Zona Media, aproximadamente a 1 500 m al noroeste del poblado.



Figuras IV.106 y IV.107. Geoforma Loma y “Joya”, Progreso, Rioverde. Área de influencia del río Choy. Estatura del niño 1.15 m.

**P15.A. Clasificación y características del sitio.**

Soil Survey Staff, 1999: Calcigypsis típico, limoso grueso, carbonático, térmico.

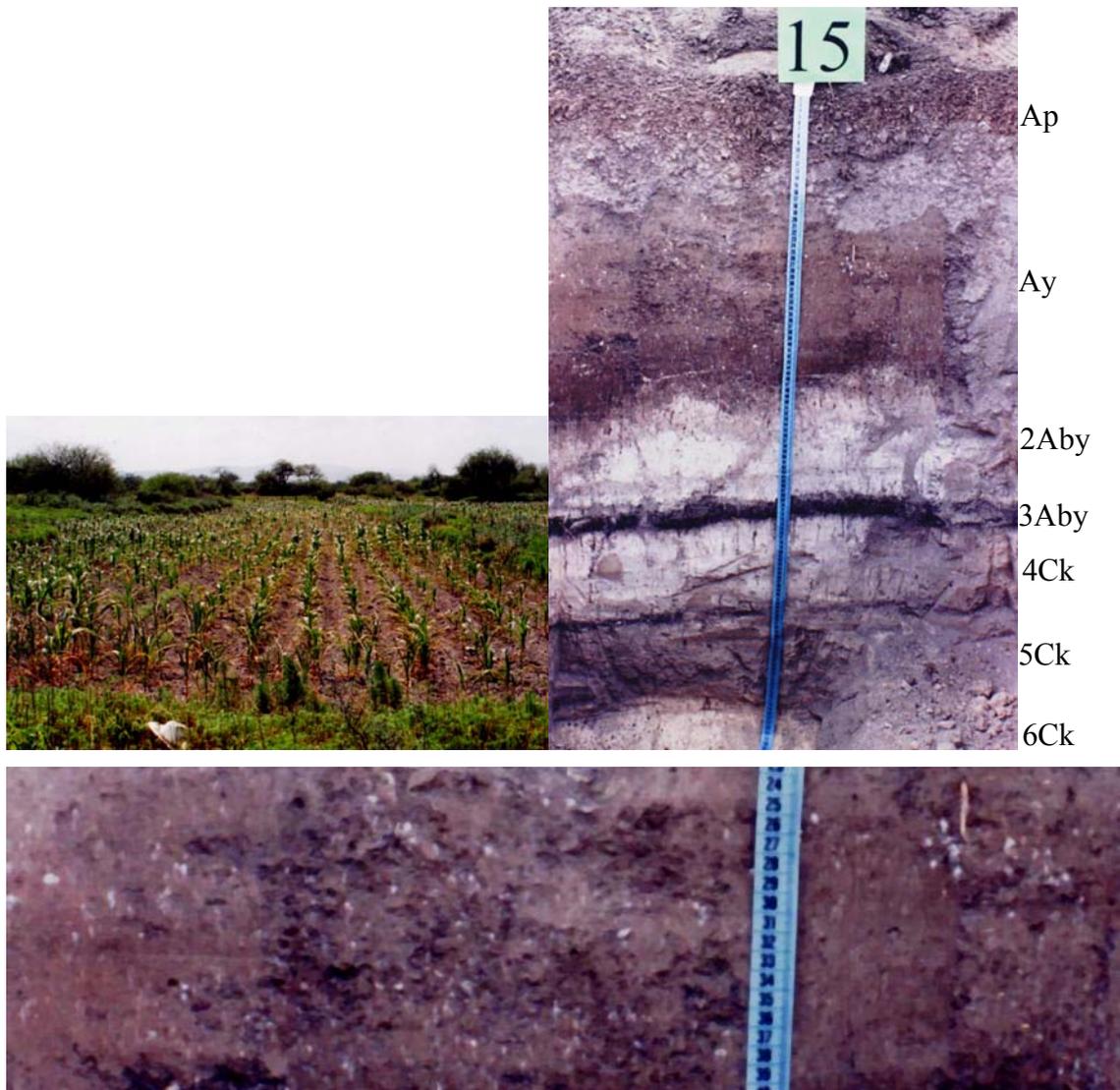
WRB, 1999: Kastanozem gípsico, orticálcico, siltico.

Uso: Agrícola, actualmente con maíz.

Relieve: Ondulado, ubicado en la parte baja, “joya”, pendiente del 2 %.

Flora: Gualdria, mezquite, nopal, huizache.

Erosión: Área deposicional, inundable cuando llueve mucho o en años anteriores. Resto de conchas, caracoles.



Figuras IV.108 y IV.109. Sitio y perfil P15. Nódulos de yeso de 3 a 6 mm en el segundo horizonte, Ay.

**P15.B. Descripción macromorfológica.**

Ap. Profundidad 0- 20 cm. Húmedo. Color en seco 10YR 4/2 y en húmedo 10YR 2/2.

Limo con gravilla. Consistencia en seco suave y en saturado pegajoso y ligeramente plástico. Estructura bloques subangulares muy débiles, tendiendo a granular. Muchas raíces finas y medias comunes. Muchos poros medios y finos. Con reacción muy violenta al HCl al 10 % y moderada al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Permeable con buen drenaje. Sin piedras. Poros de raíces rellenos. Transición tenue y límite horizontal.

Ay. Profundidad 20 – 51 cm. Ligeramente húmedo. Color en seco 10YR 3/2 y en húmedo 10YR 2/1. Franco limoso con gravilla. Consistencia en seco suave y en saturado ligeramente plástico y ligeramente pegajoso. Estructura en bloques de desarrollo medio. Raíces medias pocas y finas comunes. Muchos poros finos. Con reacción muy violenta al HCl al 10 % y ligera al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Buena permeabilidad con buen drenaje. Sin piedras. Presenta nódulos blancos (de 3 a 6 mm, en cantidad de alrededor del 10 %) que no reaccionan al HCl al 10 % por lo que denota su naturaleza yesosa. Poros de raíces rellenos. Transición gradual y límite ligeramente ondulado.

2Aby. Profundidad 51 - 69 cm. Ligeramente húmedo. Color en seco 10 YR 7/2 y en húmedo 10YR 6/2. Limo. Consistencia en seco blando y en saturado pegajoso no plástico. Estructura laminar con tendencia a bloques subangulares de desarrollo medio. Raíces finas medias y pocas. Poros finos muchos, poros de raíces. Con reacción muy violenta al HCl al 10 % y ligera al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Buena permeabilidad con buen drenaje. Sin piedras. Poros de raíces rellenos. Transición marcada y límite horizontal.

3Aby. Profundidad 69 – 73 cm. Ligeramente húmedo. Color en seco 10YR 2/1 y en húmedo 10YR 2/1-0. Franco limoso. Blando en seco, pegajoso y ligeramente plástico en saturado. Estructura granular. Pocas raíces medias. Poros finos y medios comunes. Con reacción muy violenta al HCl al 10 % y ligera al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Buena permeabilidad y drenaje. Sin piedras. Poros de raíces rellenos. Presenta tixotropía. Transición marcada y límite horizontal.

4Ck. Profundidad 73 - 94 cm.. Ligeramente húmedo. Color en seco 10YR 8/3 y en húmedo 10YR 7/2. Franco limoso. Blando en seco, pegajoso y no plástico en saturado. Estructura en bloques angulares medios, aproximadamente de 5 cm de diámetro. Pocas raíces medias. Muchos poros fino. Con reacción muy violenta al

HCl al 10 % y ligera al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Buena permeabilidad y drenaje. Sin piedras. Presenta arenilla muy fina. Poros de raíces rellenos. Transición marcada y límite ligeramente ondulado.

5Ck. Profundidad 94 – 122 cm.. Ligeramente húmedo. Color en seco 10YR 7/2 y en húmedo 10YR 6.5/2. Franco limoso. Ligeramente duro en seco, pegajoso y no plástico en saturado. Estructura bloques angulares medios aproximadamente de 5 cm de diámetro. Muy pocas raíces medias. Muchos poros de raíces. Con reacción muy violenta al HCl al 10 % y ligera al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Buena permeabilidad y drenaje. Sin piedras. Poros de raíces rellenos. Transición marcada y límite horizontal.

6Ck. Profundidad > 122 cm. Ligeramente húmedo. Color en seco 10YR 8/4 y en húmedo 10YR 7.5/4. Franco limoso. Ligeramente duro en seco, ligeramente pegajoso y no plástico en saturado. Estructura bloques angulares débiles aproximadamente de 5 cm de diámetro. Muy pocas raíces medias. Muchos poros finos y de raíces. Con reacción muy violenta al HCl al 10 % y ligera al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Buena permeabilidad y con buen drenaje. Sin piedras. Con gravilla fina. Poros de raíces rellenos.

Tabla IV.7. Resultados de los análisis físicos, químicos y mineralógicos, Pedión P15.

Profundidad cm	Horizonte	Tamaño de partículas, %			pH H <sub>2</sub> O 1:2.5	MO %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/kg suelo	CEes dS/m 25 °C	Cationes solubles mmol/l extracto				RAS
		Ar	L	Ac					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
0-20	Ap				7.8	7.08	61	2.35	8.0	28.4	0.36	0.23	0.05
20-51	Ay	18.9	68.4	12.7	8.0	6.70	26	2.60	4.4	32.8	0.18	0.88	0.20
51-69	2Aby	8.4	64.1	27.5	8.4	3.70	4	2.30	5.2	27.4	0.19	0.49	0.12
69-73	3Aby	10.0	78.5	11.5	7.8	10.0	106	2.40	7.8	31.0	0.21	0.59	0.14
73-94	4Ck	12.1	62.5	25.4	8.5	3.65	4	2.00	2.1	27.0	0.14	0.28	0.07
94-122	5Ck	13.0	61.0	26.0	8.4	2.5	15	1.70	3.5	20.8	0.17	0.28	0.08
>122	6Ck	15.5	63.3	21.2	8.3	2.6	3.5	1.40	2.4	17.4	0.15	0.20	0.06

Continuación de la Tabla IV.7.

Profundidad cm	Horizonte	CaCO <sub>3</sub> Total %	Yeso %	CIC cmol/kg suelo	Cationes intercambiables, cmol/kg suelo				PSI	Da g/cc
					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>		
0-20	Ap	56	24	34.8	33.16	1.0	0.17	0.47	1.35	1.07
20-51	Ay	64	10	24.3	17.65	6.4	0.09	0.16	0.7	1.02
51-69	2Aby	83	9	48.2	44.06	4.0	0.05	0.09	0.2	1.01
69-73	3Aby	19	12.5	56.3	48.69	7.2	0.14	0.27	0.5	NE
73-94	4Ck	82	2	43.2	41.06	2.0	0.05	0.09	0.2	1.01
94-122	5Ck	90	0.7	20.9	15.96	4.8	0.05	0.09	0.4	1.02
>122	6Ck	86	1.01	17.7	16.25	5.6	0.05	0.08	0.5	1.01
<b>Mineralogía, en orden decreciente de concentración relativa, DR-X</b>										
0-20	Ap	Calcita, yeso, cuarzo‡, feldespato‡								
51-69	2Aby	Calcita, yeso								
69-73	3Aby	Calcita, yeso, cuarzo								
> 122	6Ck	Calcita								

‡ Mineral en muy baja proporción en relación al resto de los minerales.

**P15.C. Descripción micromorfológica** Lamentablemente para este sitio no se cuenta con láminas delgadas. El análisis micromorfológico sería muy ilustrativo acerca de las características de los carbonatos y del yeso.

#### D. Interpretación.

En forma análoga a la acumulación de carbonatos propuesta por Gile *et al.* (1966), y a la presencia de yeso en el segundo horizonte en forma de nódulos el grado de gipsificación se corresponde con el estadio II.

En general los resultados de los análisis químicos coinciden con los minerales identificados por DR-X (Tabla IV.7). Los horizontes con mayor porcentaje de carbonatos de calcio equivalente tienen como principal mineral a la calcita, siguiéndole en importancia el yeso y el cuarzo en los primeros cuatro horizontes. El último horizonte solamente tiene calcita y el porcentaje de carbonatos es del 86 %. En el horizonte superficial además de calcita, yeso y cuarzo se tiene feldespato. Predominan el carbonato de calcio y el yeso debido a que en las sierras de los alrededores son más abundantes las calizas y el yeso-anhidrita. En las sierras vecinas al sitio y en el lugar donde nace el río Choy, las rocas dominantes son las calizas, yesos-anhidritas, basaltos

y las dolomitas solamente se encuentran intercaladas con el yeso y/o anhidrita o como caliza-dolomíticas (López, 1973; CRM, 1992; Hermoso, 1964), por lo tanto se descarta el predominio de dolomita en el perfil, lo cual se constató al no ser identificada por DR-X, además se tiene fuerte efervescencia al ácido clorhídrico al 10 %, característico del carbonato cálcico y no de la dolomita.

Las lomas interfluviales presentes en estas áreas y con influencia río Choy, son importantes para el estudio de las condiciones o características del suelo, su composición y la estructura de los materiales que les han permitido resistir a las fuerzas erosivas. También resultaría de interés saber si existe relación con las lomas presentes en el Altiplano (P12) o en el municipio de Ciudad del Maíz (P9). Aunque de entrada son diferentes dado el material fluvéntico del P15.



Figura IV.110. Pozo ubicado en la loma colindante al Pedión P15, mostrando la estratificación de los materiales.

**5.3. Suelos en planicie.** Las áreas planas se caracterizan por grandes llanuras con microdepresiones a veces de centímetros y por lo general de poca superficie. Es común que no haya sistema de drenaje bien definido, debido a la permeabilidad de los materiales yesosos, con estructura generalmente masiva pero sin compactación, permitiendo el ascenso o descenso del agua (Meyer, 1986), como lo indica la gran cantidad de manantiales. También influye el que el terreno sea casi plano, propiciando que con precipitaciones torrenciales, frecuente en áreas semiáridas, se supere la velocidad de infiltración fluyendo el agua en forma extendida causando inundaciones, como las ocurridas hace menos de 10 años en San Bartolo, Rioverde.

Existen zonas con influencia de escorrentías casi cada año, y en gran parte de estas áreas hay problemas de sales. Por ejemplo en Santo Domingo y Granja Militar La Gavia, Villa Juárez; en San Bartolo, Las Tablas, Pastora, Benito Juárez y San Francisco, Rioverde, entre otros lugares. No se descarta la influencia del nivel freático o de cuerpos de agua superficial en algunas áreas como es el caso de Santo Domingo, Villa Juárez. Lo mismo sucede en varios lugares del Altiplano, por ejemplo en la región de El Salado, en Vanegas, Vanegas. En las áreas llanas se han depositado sedimentos aluviales cuya potencia puede ser mayor al metro y en otras ocasiones de un centímetro o menos. Los perfiles localizados en las áreas planas se han agrupado en cuatro según la profundidad a la que se presenta el horizonte yesoso y existencia de salinidad. Así, se tienen perfiles con horizonte yesoso somero sin fase, en fase salina y salina-sódica, y suelos con horizonte yesoso profundo.

**5.3.1. Suelos en planicie con horizonte yesoso somero.** En esta geoforma se incluyen cuatro perfiles, uno en la Zona Media (P7) y tres en el Altiplano (P11, P14 y P16). Para el P16 no se tienen secciones delgadas. El P7 se ubica 500 m al suroeste de Santo Domingo, Villa Juárez, en terrenos agrícolas abandonados y descrito en un área de extracción de “cuartón”. El perfil P11 se sitúa en El Manantial a 5.5 km al suroeste de San Vicente. El P14 a 1.5 km de Vanegas y el P16 a 4.8 km al noreste de San Vicente y 1000 m al sureste de El Gallo, los tres en el municipio de Vanegas. Los perfiles P7 y P16 tienen el yeso farinoso típico, harinosos al tacto y de color rosáceo o asalmonado. El pedión P11 presenta compactación y el P14 horizonte petrogípsico. El P14 además tiene una gran cantidad de nódulos carbonáticos y esferulitas.

**Perfil P7.**

**P7.A. Clasificación y características del sitio.**

Soil Survey Staff, 1999: Haplogypsis léptico, limoso grueso, gypsico, térmico.

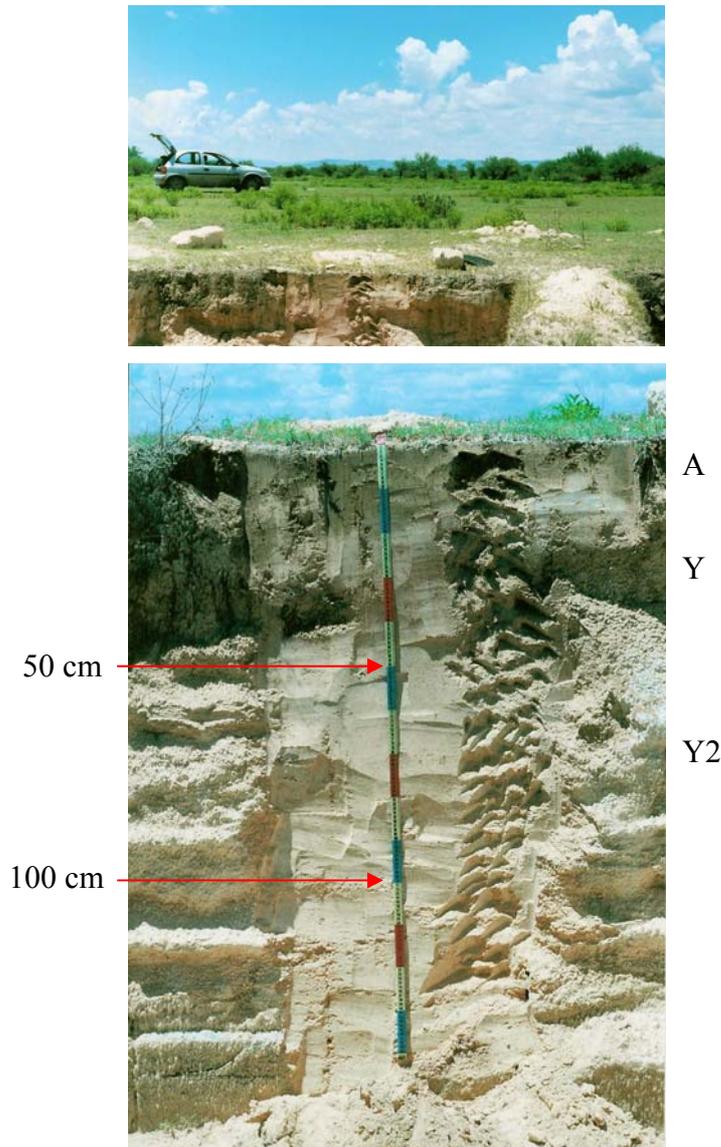
WRB, 1999: Gipsisol hipergípsico.

Uso: Obtención de “cuartón” para la construcción, pastoreo.

Relieve: Plano con ondulaciones centimétricas, pendiente menor al 2%.

Flora: Mezquite (*Prosopis laevigata*) y pasto banderita (*Bouteloua chasei*).

Erosión: Laminar leve.



Figuras IV.111 y IV.112. Sitio y perfil P7, yeso farináceo. En el primer plano de la primera fotografía la vegetación corresponde a pastizal gipsófilo (*Bouteloua chasei*), y la del fondo a matorral desértico conformado principalmente por mezquite (*Prosopis laevigata*). Sitio de obtención de “cuartón”.

**P7.B. Descripción macromorfológica.**

A. Profundidad 0 – 12 cm. Seco. Color en seco 10YR 6/2 y en húmedo 10YR 4/2.

Franco. Consistencia en seco ligeramente duro y en saturado ligeramente pegajoso y ligeramente plástico. Estructura bloques subangulares moderadamente desarrollados. Raíces de pasto principalmente en los primeros 1.5 cm. Frecuentes poros canales de raíz finos. Reacción moderada al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Permeable y con buen drenaje. Transición tenue y límite ligeramente ondulado.

Y1. Profundidad 12 - 57 cm. Seco. Color en seco 10YR 6.5/3 y en húmedo 10YR 7/4.

Franco arenoso. Estructura masivo. Consistencia en seco duro y en saturado pegajoso y ligeramente plástico. Sin raíces. Poros finos comunes. Reacción fuerte al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Permeable y con buen drenaje. Crotoquina de unos 8 cm de diámetro. Transición media y límite ligeramente ondulado.

Y2. De 57 hasta 215 cm es yeso farinoso y sin reacción al HCl al 10 %.

Tabla IV.8. Resultados de los análisis físicos y químicos, Pedión P7.

Profundidad cm	Horizonte	Tamaño de partículas, %			pH H <sub>2</sub> O 1:2.5	MO %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/kg suelo	CEes dS/m 25 °C	Cationes solubles mmol/l extracto				RAS
		Ar	L	Ac					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
12-57	Y1				8.2	0.16	4.0	2.5	11.90	12.20	0.25	0.50	0.14
> 57	Y2	De 57- 215 cm el suelo es muy uniforme, yesoso, muy similar al segundo horizonte.											

Profundidad cm	Horizonte	CaCO <sub>3</sub> Total %	Yeso %	CIC cmol/kg suelo	Cationes intercambiables, cmol/kg suelo				PSI	Da g/cc
					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>		
12-57	Y1	1.5	63.1	10.0	7.07	2.70	0.07	0.16	1.6	1.24

### **P7.C. Descripción micromorfológica**

**P7.C.1. Microestructura.** Es un suelo apedral. Solamente en los primeros dos cm de la lámina delgada corresponde a bloques subangulares muy débiles. La estructura es masiva con canales.

**P7.C.2. Huecos.** La porosidad es del 20 %. Predominan los canales con raíces activas (8 %) de hasta 1.5 mm de diámetro, o sin raíz (5 %) de 0.2 a 0.9 mm de tamaño, de paredes lisas y onduladas; el 3 % son vesículas de tamaño 0.04-0.5 mm; el 2 % son cavidades con tamaño que va de 0.09 a 0.9 mm, con paredes onduladas; el 1 % son fisuras tamaño 0.075 a 0.45 mm, de paredes lisas a rugosas; el 1 % son cámaras de 0.675 mm de tamaño, con paredes onduladas y lisas. La microestructura es masiva con canales.

**P7.C.3. Componentes orgánicos.** Los principales componentes orgánicos son de raíz, aproximadamente un 10 % de la lámina, con tamaño que va de 0.3 a 1.5 mm, amarillas el LPP, birrefringentes y la mayoría activas. En los primeros 5 mm de la lámina se encuentra la mayor actividad biológica, son frecuentes las valvas posiblemente de anélidos de 50 a 450  $\mu\text{m}$  de diámetro, de color amarillo tenue a pardo rojizo, birrefringentes (Figuras IV.112 y IV.113). Otros son componentes orgánicos anhistos amarillentos y birrefringentes. También se encuentran esporas en racimos de 40  $\mu\text{m}$  o adheridas en semicírculo a algún mineral (Figura IV.114).

### **P7.C.4. Masa basal.**

**P7.C.4.1. Material grueso.** La relación grueso/fino es de 3/1. Casi todos los minerales corresponden a yeso lenticular euhedral con tamaño que va de 20 a  $\leq 75 \mu\text{m}$ . Con frecuencia los cristales más grandes tienen líneas de polvo transversales (Figura IV.114) o longitudinales (Figuras IV.115 e IV.116), amarillentas con nícoles paralelos por lo que se pueden deber a arcilla, por dichas líneas se fragmenta el yeso (Figura IV.114); otros cristales también presentan inclusiones debidas posiblemente a micrita (Figuras IV.117 y IV.118) o a arcilla (Figuras IV.119 y IV.120). El yeso está orientado a canales y a minerales grandes.

Aproximadamente el 2 % del yeso tiene macla en punta de flecha o cola de golondrina con tamaño que varía de 60 a 180  $\mu\text{m}$ , están muy deteriorados o quebrados por lo que es difícil encontrar un elemento entero. Son muy raros los minerales aislados pardo amarillento en LPC, no pleocroicos y de aspecto transparente en nícoles paralelos y relieve moderado correspondiendo a moscovita, de tamaño menor a 90  $\mu\text{m}$ , (Figuras IV.121 y IV.122); son muy raras la biotita de color pardo amarillento en luz polarizada cruzada, birrefringente, pleocroica, y alto relieve de tamaño menor a 80  $\mu\text{m}$  (Figuras IV.121 y IV.122).

Otro mineral es la esparita, birrefringente, algunos con aspecto en “*zoning*” o zonada, tamaño menor a 30  $\mu\text{m}$ , presente principalmente en los primeros 2 cm de la lámina y asociada a restos orgánicos (Figura IV.123 y IV.124). Son raros los granos de olivino con colores de segundo orden y alto relieve, de tamaño de 50  $\mu\text{m}$  y en cantidad menor al 2 %. El cuarzo presente es menor al 1 % y tamaño de 150  $\mu\text{m}$ , poco alterado. Los minerales máficos constituyen el 1 % de la lámina y el tamaño es 60  $\mu\text{m}$ . La distribución relativa g/f es quitónica (Figuras IV.125 y IV.126), puede ser debido a que el grosor de la lámina es mayor al recomendado (30  $\mu\text{m}$ ), de lo contrario sería microgíptica.

**P7.C4.2. Material fino.** Es de color pardo amarillento en nícoles paralelos y gris en nícoles cruzados, está constituida de yeso lenticular microcristalino y microesparita. La fábrica-b es microgíptica con microesparita.

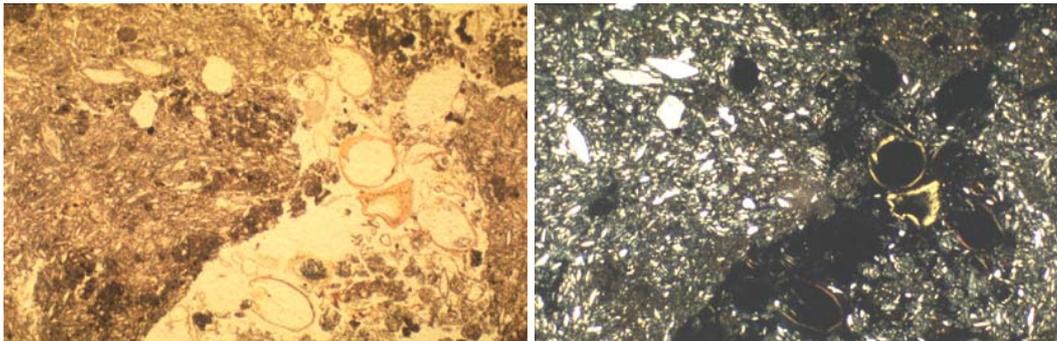
#### **P7.C.5. Edaforrasgo.**

**P7.C.5.1. Revestimientos.** Son comunes los revestimientos típicos de 125  $\mu\text{m}$  de espesor sobre raíces y con composición similar a la masa basal en los que el yeso es lenticular idiotópico equigranular, y tamaño de 40  $\mu\text{m}$  y unos pocos granos de 60  $\mu\text{m}$  (Figura IV.127 y IV.128). Son raros los revestimientos típicos de materia orgánica sobre minerales. Son frecuentes los revestimientos típicos de microesparita.

**P7.C.5.2. Rellenos.** Los rellenos son suelto incompleto en cámaras, los agregados son subredondeados constituidos de masa basal, de tamaño 0.15 a 0.9 mm, algunos con valvas de anélidos; son raros los canales con relleno suelto incompleto de material basal.

**P7.C.5.3. Nódulos.** Son raros los nódulos típicos órticos de microesparita, birrefringentes y tamaño de 0.15 a 0.6 mm. Son muy raros los nódulos típicos órticos de naturaleza órgano-mineral con o sin yeso lenticular y microesparita, de color pardo en LPP, birrefringentes, tamaño de 0.08 a 0.4 mm. En los primeros 5 mm son frecuentes los nódulos típicos disórticos redondeados, de calcita microesparítica con tamaño promedio de 50  $\mu\text{m}$ .

**P7.C.6. Excrementos.** Solamente se detectan raros pellets fecales mamilados, subarqueados, transversales al hueco, correspondiendo a lombrices.



Figuras IV.112, LPP y IV.113, LPC. Valvas o “tubos” de anélidos. Generaciones de yeso, algunos con líneas de polvo arcillosas, cristales de yeso muy orientados al hueco. Fábrica-b microgípsica. Lado mayor 3.4 mm.

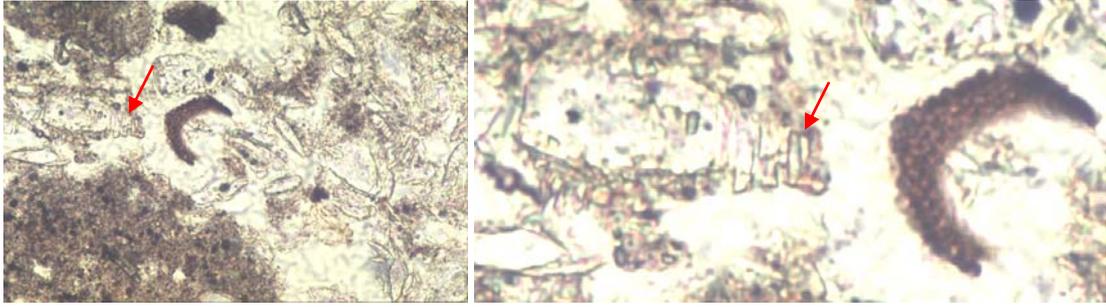
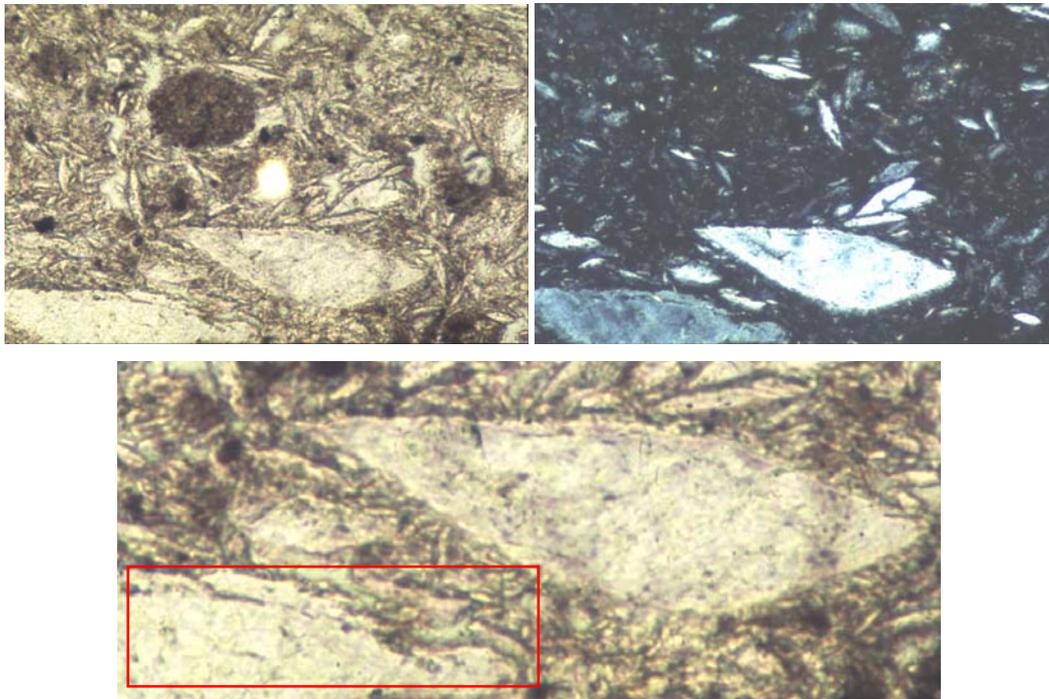
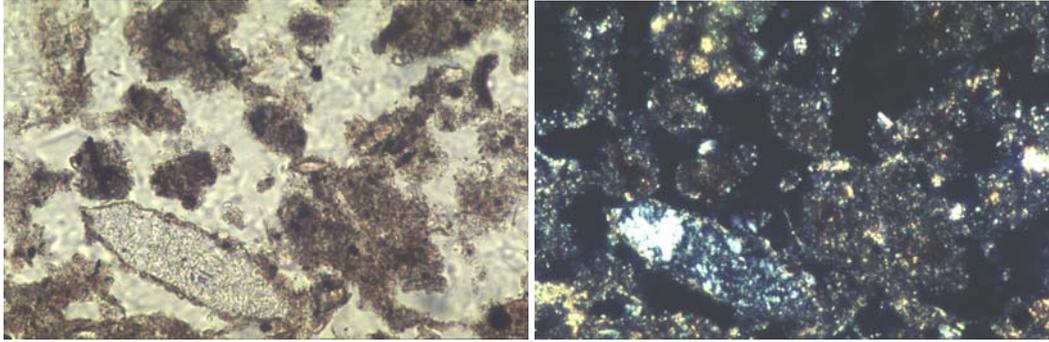


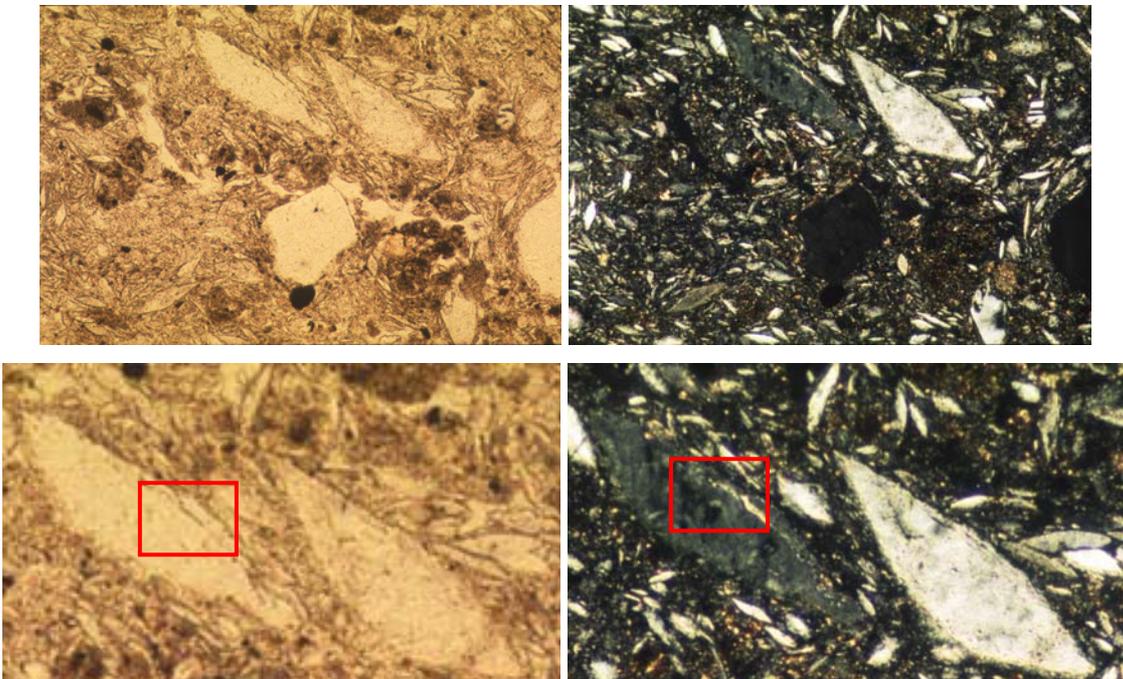
Figura IV.114, LPP. Yeso lenticular fragmentándose en forma tabular o cuasilenticular por las líneas de polvo o de debilidad. Nido botroidal de esporas en semiarco. Lado mayor de la primera Figura 0.55 mm.



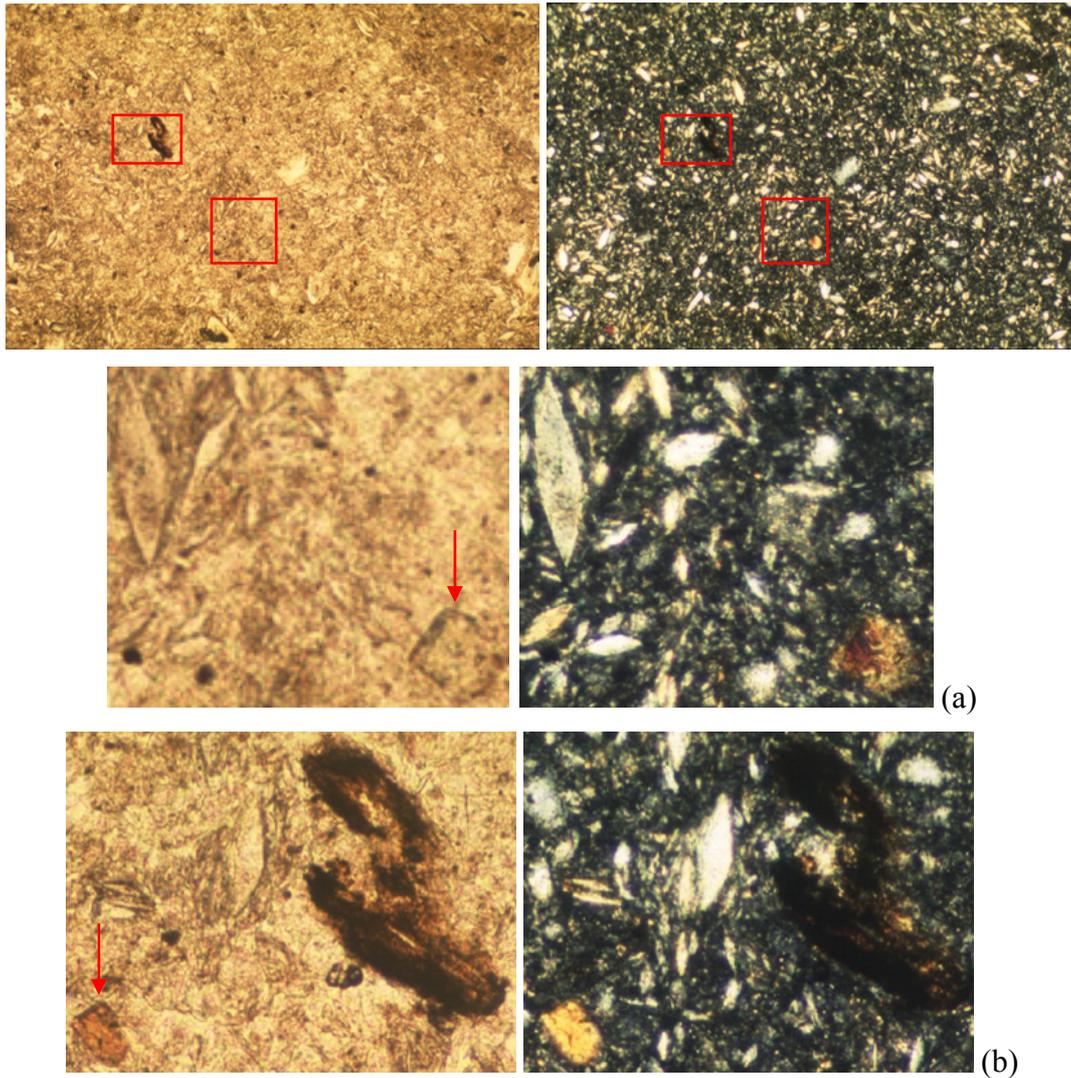
Figuras IV.115, LPP y IV.116, LPC. Yeso lenticular en la esquina inferior izquierda con acreciones en forma diagonal. Fábrica-b microgíptica. Lado mayor del primer par de Figuras 0.55 mm.



Figuras IV.117, LPP y IV.118, LPC. Yeso lenticular con revestimientos de microesparita, áreas con intrusiones de micrita ocurridas durante la cristalización del yeso. Lado mayor 0.55 mm.



Figuras IV.119, LPP y IV.120, LPC. Yeso con líneas de polvo posiblemente arcillosas. Lado mayor del primer par de Figuras 1.09 mm.



Figuras IV.121, LPP y IV.122, LPC. (a) Moscovita parda amarillenta, birrefringente no pleocroica y transparente por no tener hierro ni magnesio. (b) Biotita parda (por la sustitución de Fe en vez del Mg) y pleocroica (MacKenzie y Adams, 1997; Fabries, 1982). Lado mayor del primer par de Figuras 3.4 mm, las otras Figuras son acercamientos.

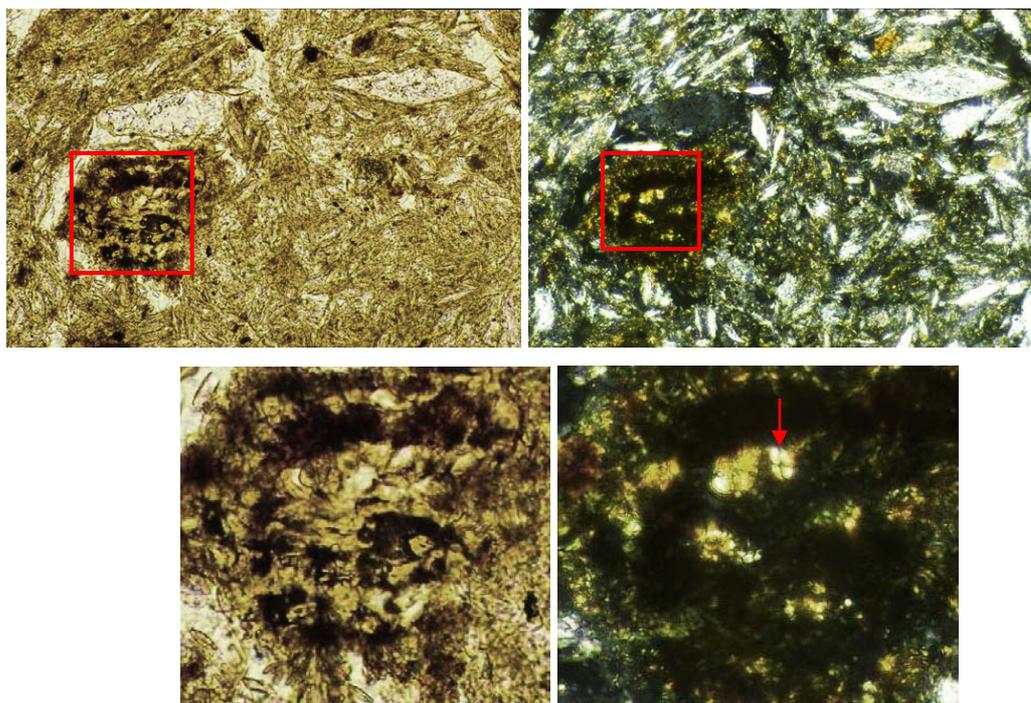


Figura IV.123, LPP y IV.124, LPC. Esferulita con interferencia pseudouniaxial, asociada a restos de tejido orgánico. Lado mayor 0.55 mm.

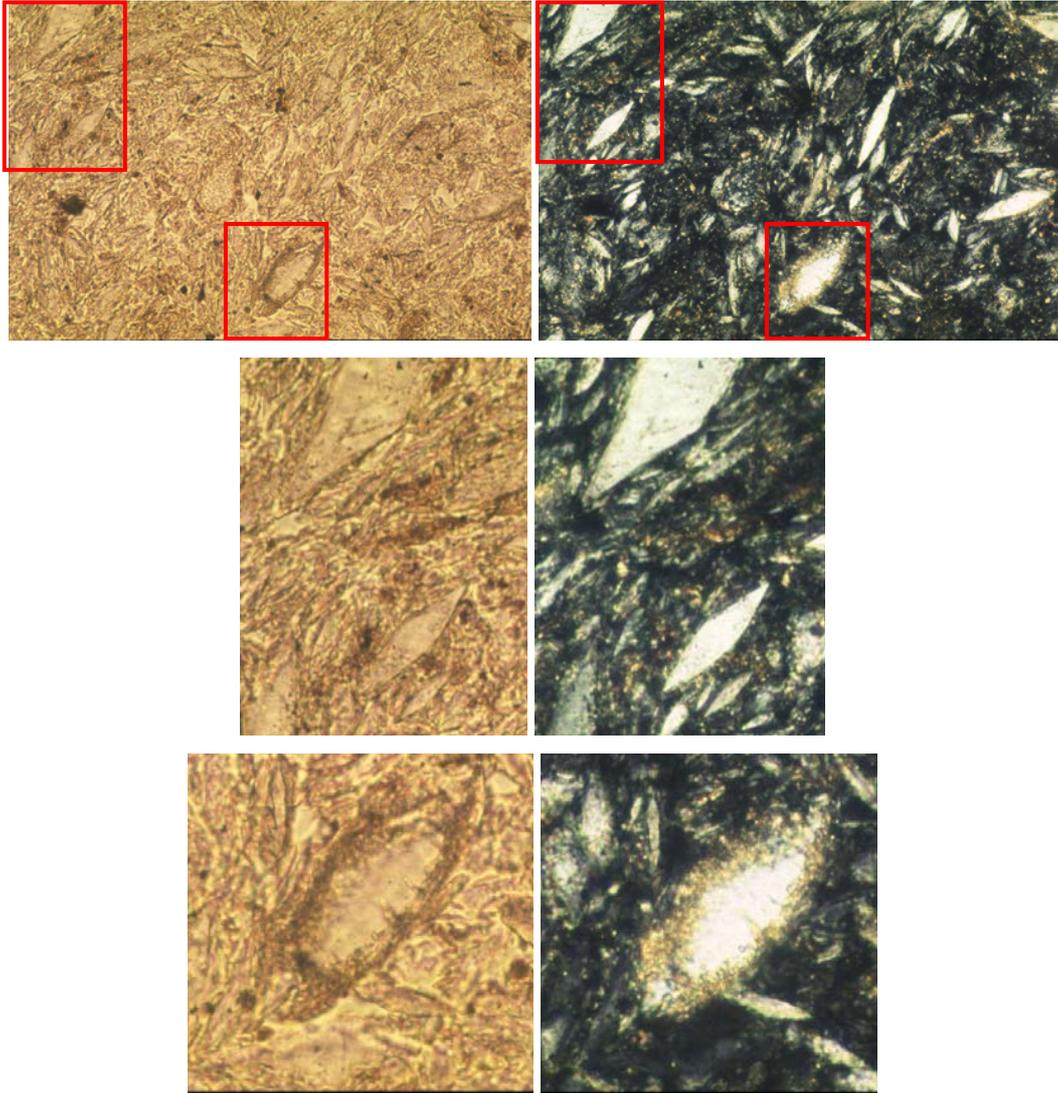
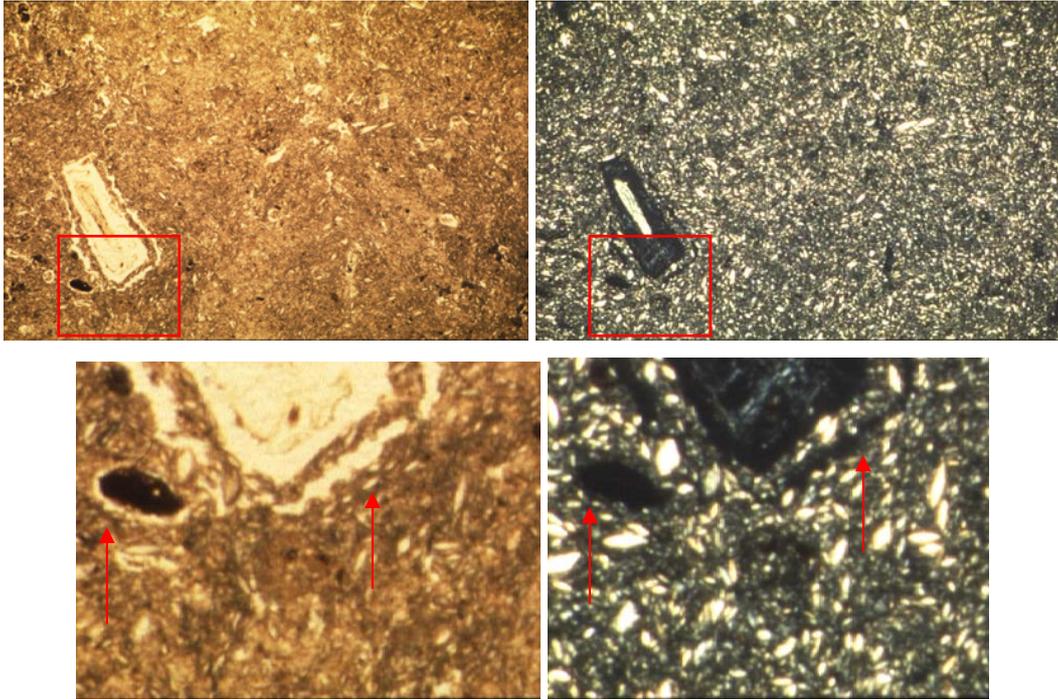


Figura IV.125, LPP y IV.126, LPC. Cristales de yeso revestidos con microesparita, distribución relativa g/f quitónica. Lado mayor del primer par de Figuras 0.55 mm.



Figuras IV.127, LPP y IV.128, LPC. Raíz activa con revestimiento de yeso microcristalino y lenticular. Yeso lenticular con orientación paralela al hueco y a nódulos. Masa basal con fábrica-b microgípsica. H: 0-10 cm. Lado mayor 6.8 mm.

**Perfil P11.**

**P11.A. Clasificación y características del sitio.**

Soil Survey Staff, 1999: Haplogypsiids léptico, limoso grueso, gypsic, térmico.

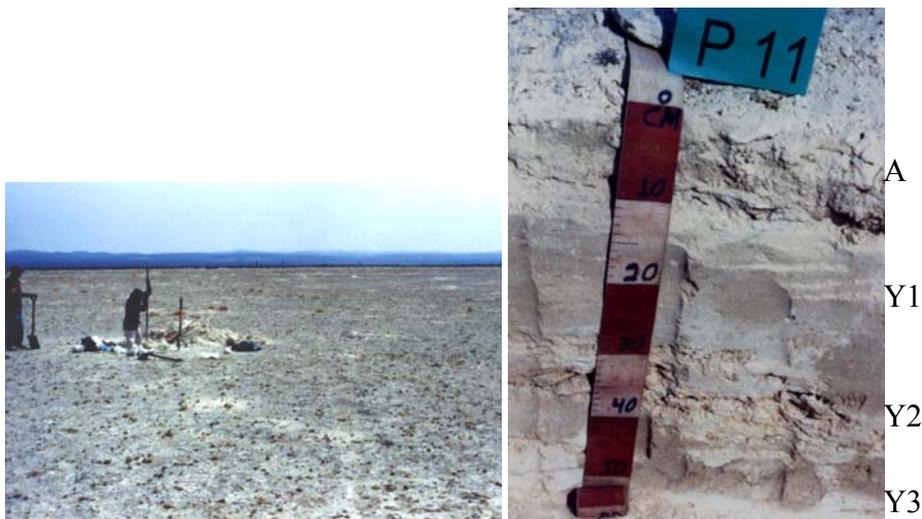
WRB, 1999: Gipsisol hipergípsico.

Uso: Apacentamiento de ganado mayor y menor (agostadero). Colonia de perrito de la pradera, *Cynomys mexicanus*.

Relieve: Plano con ligeras ondulaciones. Con costra discontinua de unos 4 mm de grosor.

Flora: Pastizal gipsófilo (*Muhlenbergia purpusii*), *Condalia mexicana*, gobernadora (*Larrea tridentata*), cardenche (*Opuntia imbricatha*), costilla de vaca (*Atriplex canescens*), romerito (*Suaeda* sp), nopal duraznillo (*Opuntia leucotricha*).

Erosión: Laminar moderada.



Figuras IV.129 y IV.130. Sitio y perfil P11. Paisaje plano con vegetación de pastizal gipsófilo.

**P11.B. Descripción macromorfológica.**

A. Profundidad 0 – 10 cm. Seco. Color en seco 10YR 8/2 y en húmedo 10YR 6.5/3.

Franco con gravilla. Consistencia en seco suelto y en saturado ligeramente pegajoso no plástico. Estructura granular con tendencia laminar. Raíces medias y finas comunes. Poros canales comunes y finos muchos. Reacción violenta al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Permeable y con buen drenaje. Presencia de costra superficial discontinua de un grosor de 2 a 4 mm. Presencia de pasaje de fauna, crotovinas. Transición marcada y límite horizontal.

- Y1. Profundidad 10 – 30/40 cm. Húmedo. Color en seco 10YR 8/2 y en húmedo 10YR 6.5/3. Franco con mucha gravilla. Consistencia en húmedo ligeramente firme y en saturado ligeramente plástico no pegajoso. Estructura masiva con tendencia laminar. No hay raíces. Poros finos muchos. Reacción muy violenta al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Permeable y con buen drenaje. Existen nódulos blancos que no reaccionan al HCl al 10 %. Transición tenue y límite ondulado.
- Y2. Profundidad 30/40 – 55 cm. Más húmedo que el horizonte anterior. Color en seco 10YR 8/1 y en húmedo 10YR 8/3. Franco con gravilla. Estructura laminar. Consistencia en húmedo friable y en saturado ligeramente pegajoso no plástico. Raíces medias solamente donde hay grietas. Poros muy finos muchos. Reacción muy violenta al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Transición marcada y límite diagonal.
- Y3. Profundidad mayor a 55 cm. Color en seco 10YR 8/1 y en húmedo 10YR 8/2. Textura no determinada debido a la dureza. Consistencia en seco muy duro. Estructura laminar. Sin raíces. Moderada reacción al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %.

Tabla IV.9. Resultados de los análisis físicos, químicos y mineralógicos, Pedión P11.

Profundidad cm	Horizonte	Tamaño de partículas, %			pH H <sub>2</sub> O 1:2.5	MO %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/kg suelo	CEes dS/m 25 °C	Cationes solubles mmol/l extracto				RAS
		Ar	L	Ac					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
10-30/40	Y1				7.9	0.50	60.5	2.0	18.0	4.0	0.30	0.50	0.14
30/40-55	Y2				8.1	0.45	15.0	2.7	14.0	20.0	0.66	1.60	0.40

Profundidad cm	Horizonte	CaCO <sub>3</sub> Total %	Yeso %	CIC cmol/kg suelo	Cationes intercambiables, cmol/kg suelo				PSI	Da g/cc
					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>		
10-30/40	Y1	6.0	85.4	20.0	17.54	2.1	0.17	0.19	1.0	1.16
30/40-55	Y2	4.5	78.9	18.0	13.14	4.5	0.14	0.22	1.2	1.20

**Mineralogía, en orden decreciente en cantidad relativa, DR-X**

0-10	A	Yeso, cuarzo
30-50	Y2	Yeso, calcita

### **P11.C. Descripción micromorfológica**

**P11.C.1. Microestructura.** En el primer horizonte el grado de pedialidad es débil, la microestructura es laminar con muy raros agregados subangulares de 1 a 3 mm. En el segundo horizonte la estructura es masiva-laminar con vesículas. La pedialidad del tercer horizonte es débil y la estructura es laminar. En el cuarto horizonte la pedialidad es muy débil y corresponde a masiva-laminar, incrementándose las vesículas con la profundidad.

**P11.C.2. Huecos.** En el primer horizonte la porosidad es del 25 %. Predominan las fisuras horizontales ligeramente onduladas con un 15 % y el tamaño varía de 0.075 a 0.5 mm, de paredes rugosas; el 3 % son poros de empaquetamiento (0.05 a 0.8 mm) de paredes rugosas; el 3 % son vesículas (0.05-0.5 mm) de paredes serradas; los canales constituyen un 2 % (0.3-1.5 mm) y son de paredes lisas; el 1 % corresponde a cámaras (0.3-0.45 mm) de paredes lisas; la microestructura es laminar. En el segundo horizonte la porosidad es del 20 %, está constituida principalmente por vesículas (13 %, 0.1-1.8 mm) de paredes rugosas a serradas (por el yeso) sin orientación; las fisuras conforman el 5 % (0.05-0.4 mm) de los huecos, con paredes rugosas, y disposición horizontal; los canales de 0.1 a 0.6 mm de grosor conforman el 2 % y son de paredes rugosas a serradas; la microestructura es masiva-laminar con vesículas.

El tercer horizonte es más poroso, 30 %, y predominan las fisuras horizontales y onduladas en un 25 % y diámetro variable de 0.025 a 3 mm, con paredes rugosas a serradas; las vesículas constituyen el 5 % de la lámina (0.08-1.0 mm) y son de paredes rugosas a serradas (debido al yeso); la microestructura es laminar con vesículas. La porosidad del cuarto horizonte es del 20 %, predominan las vesículas con un 15 % (0.08-1.0 mm) de paredes rugosas a serradas (debido al yeso); las fisuras son horizontales (4 %, 0.025-1.0 mm) de paredes rugosas a serradas; y los canales (1 %, 0.3-1.3 mm) son de paredes rugosas o serradas; la microestructura es masiva con ligera laminación y con cavidades.

**P11.C.3. Componentes orgánicos.** En el primer horizonte son frecuentes las raíces de 0.5 a 2.5 mm de diámetro, de color pardo amarillento, pardo oscuro o pardo rojizo en LPP, birrefringentes, de estructura celular fácilmente identificable; también son frecuentes los componentes orgánicos anhistos de color amarillo a pardo rojizo en LPP,

birrefringentes, de 0.05 a 1.0 mm de diámetro. Son raros los elementos orgánicos de color morado y asociados a las raíces, posiblemente correspondan a manto fúngico. En los demás horizontes no se detectaron componentes orgánicos.

#### **P11.C.4. Masa basal**

**P11.C.4.1. Material grueso, >20  $\mu\text{m}$ .** En el primer horizonte la relación g/f es 5.5/4.5. El 20 % es yeso lenticular idiotópico (20-50  $\mu\text{m}$ ) presentan moderada orientación a huecos y a cristales grandes, o perpendicular en huecos a manera de revestimientos; el 28 % es yeso lenticular idiotópico de 60 a 150  $\mu\text{m}$ , sin alterar y distribución aleatoria; el cuarzo se presenta en un 5 % y el tamaño mayor es de 120  $\mu\text{m}$ ; El 1 % es calcita de 40 a 60  $\mu\text{m}$  de tamaño; el 1 % son minerales máficos de tamaño de 25 a 40  $\mu\text{m}$ . La distribución relativa g/f es porfírica espacio simple.

En el segundo horizonte la relación g/f es de 5.5/4.5 con predominancia (50 %) del yeso lenticular idiotópico inequigranular con tres tamaños de 20 a 35  $\mu\text{m}$ , 60  $\mu\text{m}$  y algunos cristales alcanzan las 300  $\mu\text{m}$ , casi todos tienen líneas de polvo transversales, los cristales están sin orientación u orientados paralelamente a huecos y a cristales grandes; los minerales máficos constituyen el 2 % y el cuarzo el 1 %; también hay esparita (2 %, 20-60  $\mu\text{m}$ ) subredondeada y de bordes lisos, principalmente en poros. La distribución relativa g/f es porfírica espacio simple.

En el tercer horizonte la relación g/f es de 3/2. Predomina el yeso lenticular (55 %), los cristales alterados son hipidiotópicos, con tamaño de 20 a 225  $\mu\text{m}$ , con líneas de polvo transversales, son raros los granos de yeso con fragmentación en “tablas”, presentan orientación paralela a fisuras o rellenándolas; los granos de yeso más pequeños están orientados paralelamente a los cristales grandes. La distribución relativa g/f es porfírica espacio simple.

En el cuarto horizonte la relación g/f es de 6.5/3.5. El 60 % corresponde a yeso lenticular idiotópico a xenomórfico (Figuras IV.131 y IV.132), tamaño de 20 a 300  $\mu\text{m}$ , el idiomórfico con fuerte orientación paralela a huecos y cristales grandes, y el hipidiomórfico y xenomórfico rellenando o revistiendo huecos. El 2 % es calcita citomorfa de bordes lisos, conservando el borde celular y estructura del tejido en general

o algunos cristales aislados (Figuras IV.133 a IV.136). El 3 % está conformado por cuarzo la mayor parte de tamaño 25  $\mu\text{m}$ , y solamente se encontró un elemento de 300  $\mu\text{m}$  de diámetro. La distribución relativa g/f es porfírica espacio simple.

**P11.C.4.2. Material fino.** En las cuatro secciones delgadas el material fino es de color pardo amarillento en luz polarizada plana y grisáceo en luz polarizada cruzada, constituida de yeso microcristalino, micrita, microesparita y cuarzo. La fábrica-b es microgípsica con microesparita en la primera y tercera lámina; en la segunda y cuarta sección delgada la fábrica-b es microgípsica con micrita y microesparita. Es frecuente la descalcificación del material fino (Figuras IV.133, IV.134, IV.137, y IV.138).

#### **P11.C.5. Edaforrasgos.**

**P11.C.5.1. Revestimientos.** En el primer horizonte son raros los revestimientos típicos de materia orgánica de color pardo oscuro sin birrefringencia. Son raros los hiporrevestimientos de color pardo, de naturaleza limo-carbonática, sin birrefringencia y con revestimiento de yeso lenticular en forma radial; son abundantes los revestimientos típicos en huecos correspondiendo a yeso lenticular xenomórfico a idiomórfico, en forma paralela o radial.

En el segundo horizonte los revestimientos típicos son muy abundantes y corresponden a yeso xenomórfico o idiomórfico con orientación paralela o radial en prácticamente todos los huecos; los revestimientos típicos de materia orgánica son muy raros; los hiporrevestimientos de micrita son muy raros (Figura IV.139).

En el tercer horizonte son abundantes los revestimientos tipo geopetal o colgantes de yeso lenticular en fisuras (Figuras IV.140 y IV.141); son abundantes los revestimientos típicos de yeso xenomórfico soldados o indentados con coeficiente de extinción no lineal.

En prácticamente todos los huecos del cuarto horizonte presentan revestimiento paralelo a radial de yeso lenticular idiotópico a hipidiotópico. Son abundantes los revestimientos paralelos de yeso lenticular parcial o totalmente soldados; son raros los hiporrevestimientos de micrita en huecos. En todo el perfil se presentan

hiporrevestimientos de empobrecimiento en agregados “islas” de material fino limo-carbonático, con fábrica grano estriada (Figuras IV.137, IV.138, IV.142 y IV.143).

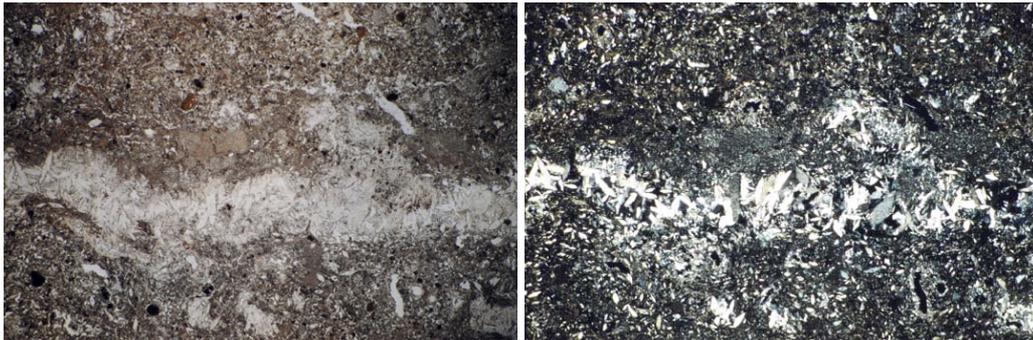
**P11.C.5.2. Rellenos.** En el primer horizonte se tienen abundantes rellenos denso completo (0.1-0.8 mm) de yeso lenticular microcristalino; son frecuentes los rellenos denso incompleto menores a 12 mm de color pardo correspondientes a yeso lenticular idiotópico, microesparita y excretas, estas últimas de 1.2 mm de diámetro; son frecuentes los rellenos denso incompleto de masa basal. En el segundo horizonte nuevamente abundan los rellenos densos completos de yeso lenticular, algunos de yeso lenticular inequigranular (30-90  $\mu\text{m}$ ); son frecuentes los rellenos denso incompleto de yeso lenticular idiotópico inequigranular; son frecuentes los rellenos suelto continuo de yeso lenticular idiotópico.

En el tercer horizonte son abundantes los rellenos denso incompletos o completo de yeso idiotópico a xenomórfico en fisuras; son frecuentes los rellenos denso completo o incompleto de yeso lenticular idiotópico. En el cuarto horizonte son abundantes los rellenos denso completo de yeso lenticular inequigranular con cristales menores a 60  $\mu\text{m}$  o entre 60 y 130  $\mu\text{m}$ , y algunos son de yeso microcristalino; son frecuentes los rellenos denso incompleto de yeso xenomórfico en huecos más grandes, en ocasiones adquieren la forma de roseta (Figuras IV.144 y IV.145).

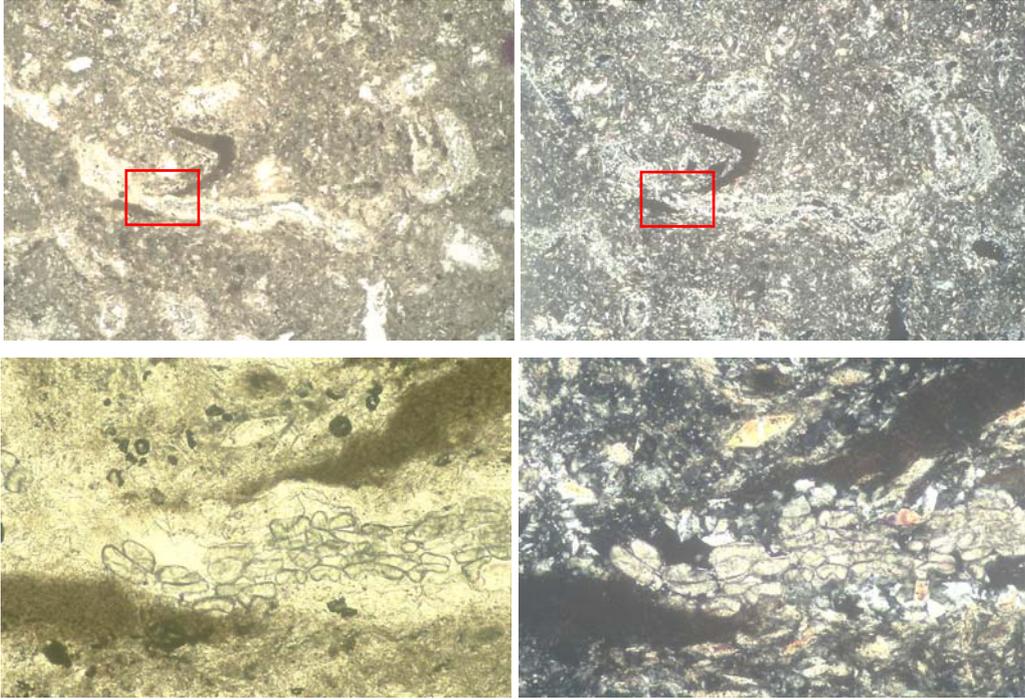
**P11.C.5.3. Nódulos.** En el primer horizonte son frecuentes los nódulos órticos típicos (0.1 – 2.0 mm) de color pardo amarillento, de forma irregular, con fábrica-b interna cristalítica gypsica, de naturaleza yeso microcristalino; son frecuentes los nódulos disórticos típicos de yeso microcristalino; son muy raros los nódulos órticos típicos, ovalados, de color pardo en LPP, birrefringentes, de 1 mm, de naturaleza órgano mineral, posiblemente de origen animal. En el segundo horizonte son frecuentes los nódulos típicos de color pardo amarillento, de forma irregular a subredondeada, órticos, de naturaleza gypsica microcristalina y fábrica-b interna cristalítica gypsica (0.1 a 0.9 mm); son frecuentes los nódulos órticos típicos (0.1 a 1.8mm) de yeso lenticular idiotópico o hipidiotópico.

En el tercer horizonte son frecuentes los nódulos típicos de 0.1 a 1.0 mm, de color gris en LPC y pardo amarillento en LPP, de forma irregular densa, de naturaleza yeso microcristalino. En el cuarto horizonte son frecuentes los nódulos órticos típicos, 0.3 a 1.5 mm, de yeso lenticular o microcristalino.

**P11.C.6. Excrementos.** En el primer horizonte se tienen agregados organo-mineral redondeados de color pardo punteado y tamaño 1.4 mm, con fábrica-b interna cristalítica, probablemente corresponden a larvas de *Adelidae* o *Bibionidae*; otros excrementos corresponden a oribátidos; hay un esqueleto esférico, birrefringente y relleno de material del suelo, posiblemente sea una valva de anélido. En el segundo horizonte se presentan excrementos de forma basidio cilíndrica truncada, alterados, con fábrica-b interna microesparítica o grano estriada, pueden corresponder a larvas de *Tipulidae*. En el tercero y cuarto horizonte no se detectaron excrementos.



Figuras IV.131, LPP y IV.132, LPC. Yeso lenticular idiomórfico a xenomórfico rellenando una fisura. Lado mayor 6.8 mm.



Figuras IV.133, LPP a IV.136, LPC. Calcita citomorfa de aspecto transparente debido a su reciente cristalización. Se tienen algunas islas de micromasa parcialmente descalcificadas. Lado mayor 6.8 y 1.09 mm.

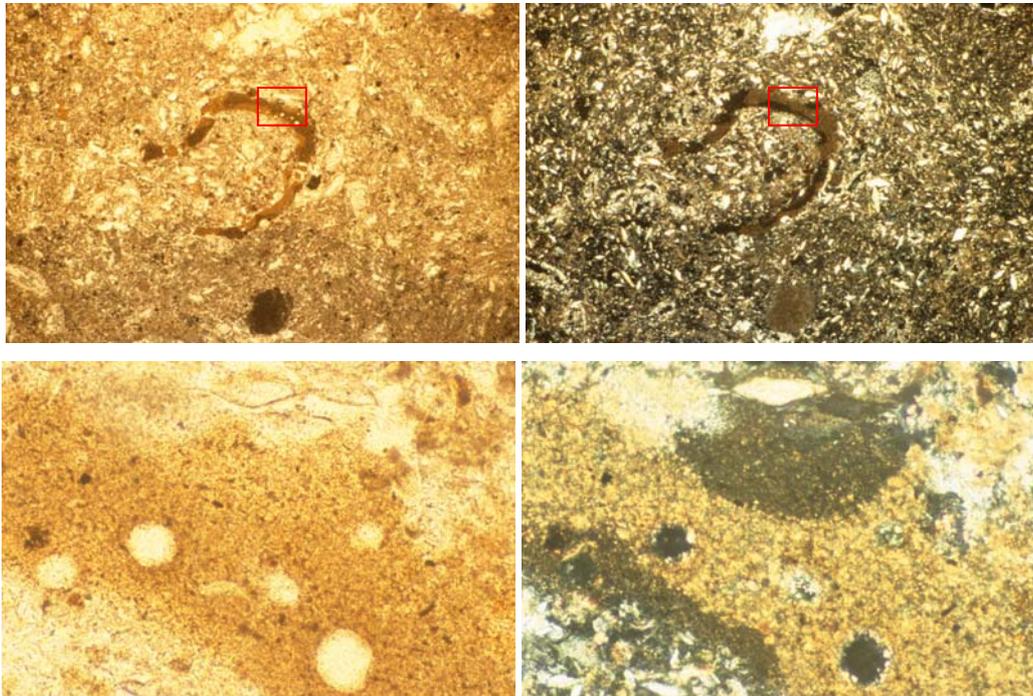


Figura IV.137, LPP y IV.138, LPC. Agregado en “media luna” debido a actividad de la mesofauna, con hiporrevestimientos de empobrecimiento de calcio. Lado mayor 6.8 mm.

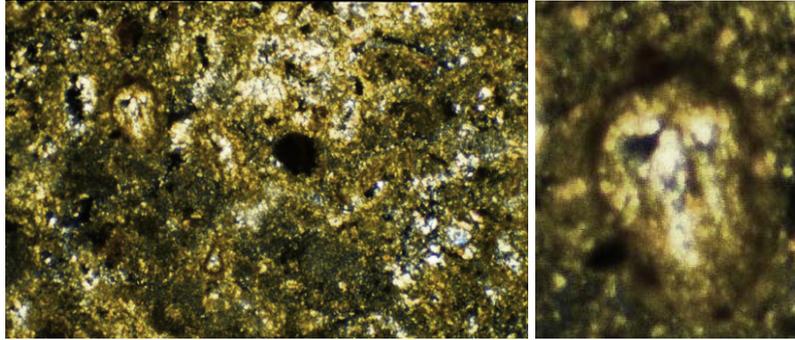
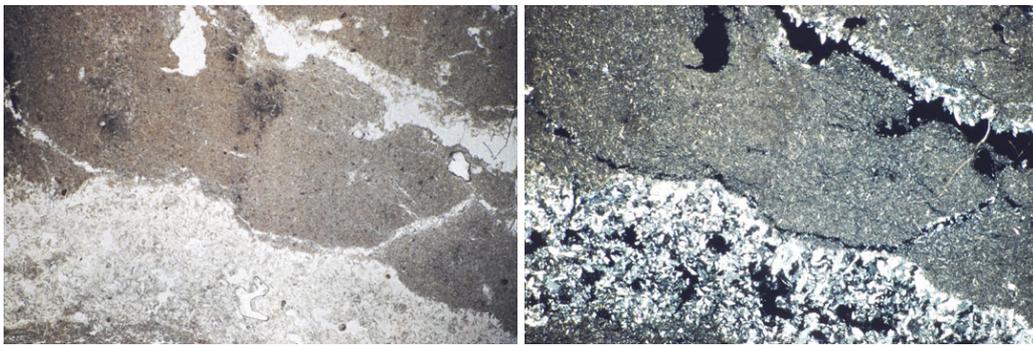
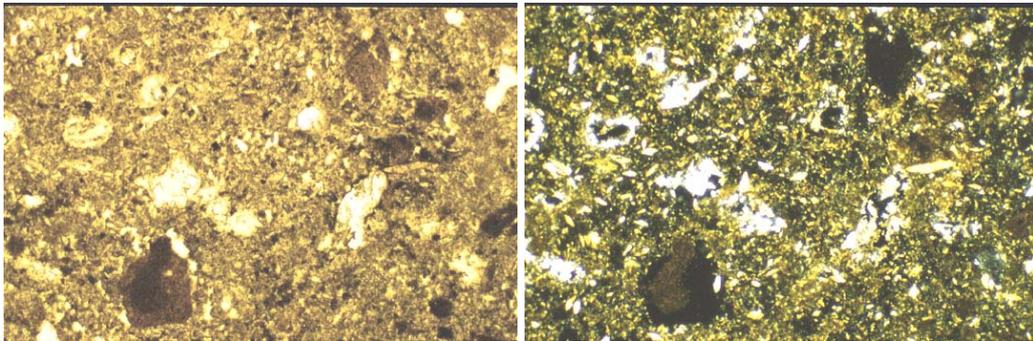


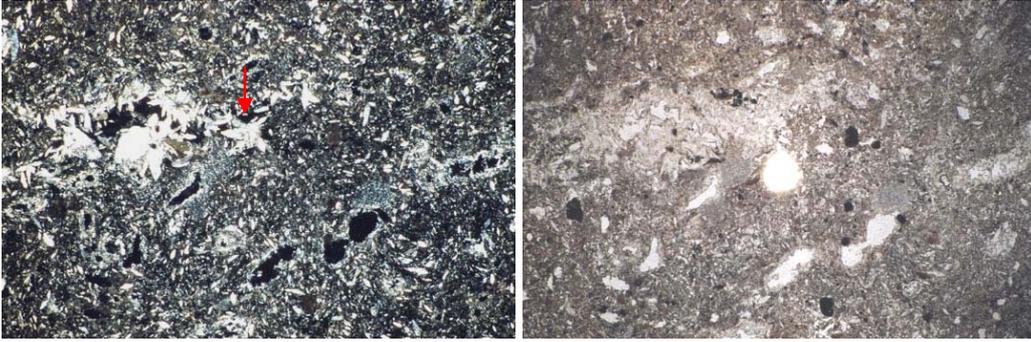
Figura IV.139, LPC. Hiporrevestimiento limo carbonático con posterior relleno de yeso indentado. Lado mayor 3.4 mm



Figuras IV.140, LPP y IV.141, LPC. Fisuras con reprecipitación de yeso en forma geopetal. Lado mayor 3.4 mm.



Figuras IV.142, LPP y IV.143, LPC. Isla con hiporrevestimiento de empobrecimiento (o descalcificación) parcial o total. Lado mayor 3.4 mm.



Figuras IV.144, LPP y IV.145, LPC. Relleno con yeso en forma de rosa del desierto.

Estructura masiva vesicular. Lado mayor 6.8 mm.

**Perfil P14.**

**P14.A. Clasificación y características del sitio.**

Soil Survey Staff, 1999: Petrogypsis cálcico, franco, gypico, térmico, superficial.

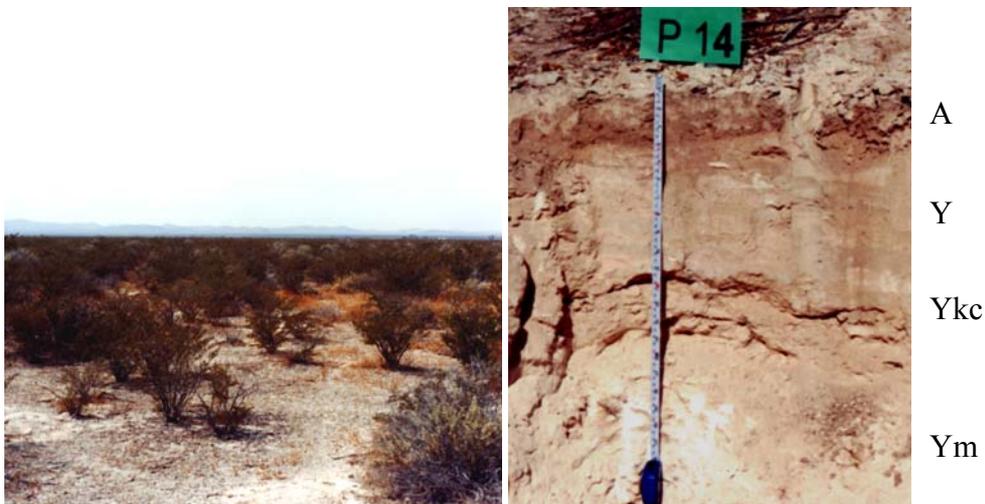
BRMRS, 1999: Gipsisol epipétrico, orticálcico, hipergípico.

Uso: Apacentamiento de ganado mayor y menor (agostadero).

Relieve: Plano con ondulaciones centimétricas.

Flora: Gobernadora (*Larrea tridentata*), saladillo (*Atriplex canescens*), tasajillo (*Opuntia spp*).

Erosión: Laminar moderada.



Figuras IV.146 y IV.147. Sitio y Perfil P14. Vegetación de matorral desértico, cuyo principal componente es la gobernadora, *Larrea tridentata*.

**P14.B. Descripción macromorfológica.**

A. Profundidad 0- 2/7 cm. Seco. Color en seco 10YR 6/3 y en húmedo 10YR 4/4.

Franco arcillo limoso. Consistencia en seco suelto y en saturado pegajoso ligeramente plástico. Estructura granular. Raíces medias pocas y finas comunes. Muchos poros medios y finos. Reacción muy violenta al HCl al 10 % y moderada al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Mal drenaje y con mala permeabilidad. Sin piedras. Transición marcada y límite ondulado. En sección delgada nódulos carbonáticos (25 %) 0.09 a 0.225 o en agregados de hasta 1.0 mm.

Y. Profundidad 2/7 – 13/17 cm. Ligeramente húmedo. Color en seco 10YR 8/2 y en húmedo 10YR 7.5/3. No se determinó por dureza. Consistencia en seco extremadamente duro, quebradizo con el martillo de geólogo. Estructura masiva.

No hay raíces. Poros finos muy pocos. Reacción violenta al HCl al 10 % y muy poca al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Mal drenaje y mala permeabilidad. Presencia de yeso cementado o endurecido discontinuo, con piedras planas horizontales de hasta 65 cm de largo, y poco suelo entre las piedras, posteriormente se tiene el tercer horizonte en el que hay más suelo que penetra por entre las piedras o grietas, formando especie de bolsas. No se muestreó para análisis fisicoquímicos, sólo para secciones delgadas. Transición marcada y límite muy ondulado.

Ykc. Profundidad 13/17 – 40 cm. Ligeramente húmedo. Color en seco 10 YR 8/3 y en húmedo 10YR 7/4. Franco limoso. Consistencia en saturado ligeramente pegajoso y ligeramente plástico. Estructura masiva con tendencia a bloques subangulares desarrollo medio. Raíces finas comunes, medias muy pocas. Poros medios y finos muchos. Reacción violenta al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Buen drenaje y buena permeabilidad. Piedras ricas en yeso de hasta 20 cm. Penetración del primer horizonte, a través de grietas o fracturas con acumulación discontinua. Transición marcada y límite muy ondulado. En sección delgada nódulos carbonáticos (10 %) 0.03 a 0.065 o en agregados de hasta 0.5 mm.

Ym. Profundidad mayor a 40 cm. Ligeramente húmedo. Color en seco 10YR 7/3 – 7.5YR 8/4 y en húmedo 10YR 7/4 – 7.5YR 7/6. No se determinó la textura por ser muy duro. Extremadamente duro en seco. Estructura laminar. Sin raíces. Poros finos muy pocos. Reacción violenta al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Mal drenaje y mala permeabilidad. Sin piedras. Presencia de cristales pequeños.

Tabla IV.10. Resultados del análisis físicos, químicos y mineralógicos, Pedión P14.

Profundidad cm	Hori-zonte	Tamaño de partículas, %			pH H <sub>2</sub> O 1:2.5	MO %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/kg suelo	CEes dS/m 25 °C	Cationes solubles mmol/l extracto				RAS
		Ar	L	Ac					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
0-2/7	A	7.0	79.0	14.0	7.9	3.8	901	2.40	20	4	1.6	2.30	0.65
2/7-13/17	Y	Sin análisis fisicoquímicos.											
13/17-40	Ykc				8.0	1.1	294	2.45	19	2	1.5	1.05	0.33
> 40	Ym	Sin análisis fisicoquímicos											

Continuación de la Tabla IV.10.

Profundidad cm	Hori-zonte	CaCO <sub>3</sub>		CIC cmol <sub>c</sub> /kg suelo	Cationes intercambiables, cmol <sub>c</sub> /kg suelo				PSI	Da g/cc
		Total	Yeso		Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>		
		%	%							
0-2/7	A	16.0	11.6	21.0	19.13	1	0.32	0.55	NE	
2/7-13/17	Y	Sin análisis fisicoquímicos								
13/17-40	Ykc	5.0	77.0	16.0	13.45	2	0.20	0.35	1.05	
> 40	Ym	Sin análisis fisicoquímicos								
<b>Mineralogía, en orden decreciente en cantidad relativa, DR-X</b>										
02/7	A	Calcita, cuarzo, esmectita (nontronita‡), feldespato‡								
13/17-40	Ykc	Yeso, cuarzo								

‡ Mineral en muy baja proporción en relación al resto de los minerales.

#### P14.C. Descripción micromorfológica.

**P14.C.1. Microestructura.** La estructura del primer horizonte es moderada y consiste de muy pocos bloques subangulares de 0.5 a 6 cm, de paredes lisas; los más grandes están parcialmente acomodados y con disposición horizontal, e integrados por agregados menores a 0.5 mm; por lo tanto la microestructura se puede considerar de bloques subangulares y granular, con abundantes (25 %) nódulos carbonáticos y bioporos. El segundo horizonte es apedral, con estructura masiva con vesículas y con aspecto laminar debido a las bandas de yeso soldado.

El grado de pedialidad del tercer horizonte es moderada, la microestructura es de bloques subangulares débiles y granular con agregados de tamaño (0.5-2.0 mm, 0.15-0.5 mm y <0.15 mm) menor a los del primer horizonte, y también tiene muchos nódulos similares a los de la primera lámina aunque en menor cantidad (10 %). El cuarto horizonte es apedral, masivo con organización en islotes limo arcillosos-carbonáticos.

**P14.C.2. Huecos.** La porosidad de la lámina del primer horizonte es 35 %. Predominan los huecos de empaquetamiento (30-110 µm, 12 %) siguiéndole en importancia las fisuras (0.03-6.0 mm, 10 %) las más pequeñas son intra-agregados, horizontales; las cámaras de 1 a 3.8 mm conforman el 8 %; los canales de 1 a 3 mm el 5 %; la microestructura es de bloques subangulares y granular con bioporos. En el segundo horizonte la porosidad es del 15 %, constituida básicamente de vesículas (12 %, 30-200

$\mu\text{m}$ ) y fisuras (3 %, 40-300  $\mu\text{m}$ ) con cierta horizontalidad, todos son con paredes rugosas o serradas; la microestructura es masiva-laminar con vesículas.

En la tercera lámina la porosidad es del 25 %. Predominan los huecos de empaquetamiento compuesto (10 %, 25-100  $\mu\text{m}$ ); el 5 % son canales de 0.3 a 0.7 mm y el 3 % cámaras 0.1-0.8 mm; el 4 % son fisuras de 40 a 180  $\mu\text{m}$ ; el 3 %, vesículas de 75 a 500  $\mu\text{m}$ ; todos son de paredes rugosas a lisas; la microestructura es bloques subangulares débiles y granular, con nódulos y bioporos. La porosidad en la cuarta lámina es del 15 % y predominan las vesículas (80 – 400  $\mu\text{m}$ ) con un 9 % con paredes rugosas o serradas (debido al yeso) y pocas con paredes lisas; le sigue en importancia las fisuras con un 4 % y diámetros de 60 a 250  $\mu\text{m}$  con paredes rugosas o serradas; por último las cámaras constituyen el 2 % y tamaño de 1.0 a 3.5 mm con paredes rugosas; la microestructura es masiva vesicular con bioporos, y con organización en islotes.

**P14.C.3. Componentes orgánicos.** En el primer horizonte son abundantes las raíces de 125 a 300  $\mu\text{m}$  de diámetro con o sin flobafeno, en las más viejas (0.15 a 2.0 mm) no se aprecia la estructura celular; hay abundantes pelos radiculares de aspecto transparente en LPP, muchos están calcificados; hay restos orgánicos anhistos amarillos en LPP, birrefringentes y otros rojos tanto en luz polarizada plana como en nícoles cruzados aproximadamente de 30  $\mu\text{m}$  (< 1 %); hay hifas la mayoría flobafenizadas; algunas valvas circulares que posiblemente correspondan a anélidos.

En el segundo horizonte no se aprecia actividad de raíces ni de microorganismos, solamente hay algunas impregnaciones de materia orgánica y un componente orgánico anhisto rojo muy vivo, birrefringente, triangular de 50  $\mu\text{m}$ . En el tercer horizonte son frecuentes las raíces de un grosor de 0.3 a 0.7 mm y de color pardo oscuro o pardo pálido, algunas son birrefringentes y prácticamente en todas se aprecia la estructura celular; son raros los componentes orgánicos anhistos rojos de 30-45  $\mu\text{m}$  tamaño, subredondeados, algunos son birrefringentes. En el cuarto horizonte no se detectaron componentes orgánicos.

#### **P14.C.4. Masa basal**

**P14.C.4.1. Material grueso.** La relación grueso/fino del primer horizonte es 1/3. Predomina la calcita con un 12 % mal clasificada (20 – 125  $\mu\text{m}$ ), algunos con macla polisintética, poca esparita < 30  $\mu\text{m}$  con extinción en “*zoning*” o radial considerados como esferulitas (Figura IV.148 y IV.149); le sigue en importancia el cuarzo mono o policristalino con un 7 %, cuyo tamaño varía de 30 a 300  $\mu\text{m}$ ; los minerales máficos constituyen el 4 % y tamaño menor a 45  $\mu\text{m}$ ; la biotita < 1 % con pleocroismo, birrefringente, de color pardo y tamaño < 35  $\mu\text{m}$ ; son raros (1 %) los granos de ortoclasa con tamaño de 30 – 35  $\mu\text{m}$ ; existen algunos (< 1 %) cristales de whewelita con tamaño menor a 25  $\mu\text{m}$ . La distribución relativa g/f es porfírica abierta.

En el segundo horizonte la relación grueso/fino es de 3/7. El yeso lenticular hipidiotópico predomina con un 17 %, con cierta equigranularidad y cuyo tamaño varía de 20 a 45  $\mu\text{m}$ , con orientación paralela a poros; el 7 % lo constituye el yeso lenticular inequigranular idiotópico con tamaño variable (45 – 150  $\mu\text{m}$ ) y con orientación paralela en fisuras; el otro 6 % en yeso xenomórfico, con componentes de extinción no uniforme (c.e.n.u.). La distribución relativa g/f es porfírica abierta.

En el tercer horizonte la relación grueso/fino es de 1/3. Predomina el yeso lenticular con un 10 % (< 30  $\mu\text{m}$ ); le sigue en importancia la calcita con un 7 % (25-110  $\mu\text{m}$ ); el cuarzo con un 4 % (50-300  $\mu\text{m}$ ); máficos con un 2 % (< 60  $\mu\text{m}$ ); ortoclasa con un 1 % (60-112  $\mu\text{m}$ ); menos del 1 % es biotita (< 25  $\mu\text{m}$ ); la whewelita se presenta (<1 %) de tamaño < 20  $\mu\text{m}$  (Figura IV.150 y IV.151); olivino de 60  $\mu\text{m}$  constituye menos del 1 %. La distribución relativa g/f es porfírica abierta.

En el cuarto horizonte la relación grueso/fino es 4.5/5.5. Predomina (25 %) el yeso lenticular equigranular (20-50  $\mu\text{m}$ ) idiotópico con fuerte orientación a huecos e islas; el 7 % es yeso lenticular inequigranular (50 a 180  $\mu\text{m}$ ) idiotópico; el 7 % es yeso indentado en rellenos y nódulos; el cuarzo mal clasificado constituye el 3 % y tamaño de 40 a 225  $\mu\text{m}$ ; la calcita presente en un 2 % y mal clasificada (30-90  $\mu\text{m}$ ); la esparita con un 1 % (20-25  $\mu\text{m}$ ); granos aislados (<< 1 %) de biotita de 50  $\mu\text{m}$  (Figura IV.152 y IV.153). La distribución relativa g/f es porfírica a simple espacio, con predominio de organización en islotes.

**P14.C.4.2. Material fino.** En el primer horizonte el material fino es de color pardo amarillento moteado en LPP, y grisáceo en LPC, está constituida de microesparita, calcita y cuarzo, la fábrica-b es cristalítica microesparítica. En el segundo horizonte el material fino es de color amarillento, punteado, de color gris en nícoles cruzados, conformada por yeso microcristalino y microesparita, la fábrica-b es gípsica microcristalina y poroestriada. El material fino de las islas tiene fábrica-b cristalítica microesparítica.

La micromasa del tercer horizonte es de color pardo amarillento, punteada, constituida de yeso microcristalino, y las islas son calcita microesparítica y cuarzo; la fábrica-b es gípsica microcristalina y poroestriada. Las islas tienen fábrica-b microesparítica. En el cuarto horizonte la micromasa es de color pardo amarillento-rojizo, punteada, color de interferencia gris o pardo, se compone de microesparita y de yeso microcristalino. La fábrica-b es microesparítica y microgípsica. Organización en islas.

#### **P14.C.5. Edaforrasgos**

**P14.C.5.1. Revestimientos.** En la sección delgada del primer horizonte son frecuentes los revestimientos típicos de materia orgánica, menores a 20  $\mu\text{m}$ , algunos son birrefringentes, presentes en cristales, agregados, nódulos, e incluso sobre revestimientos de micrita en poros; son frecuentes los revestimientos típicos posiblemente de oxi-hidroxidos de hierro en cristales y algunos agregados; también son frecuentes los revestimientos típicos e hiporrevestimientos de micrita (desde < 20 a 60  $\mu\text{m}$ ) en fisuras; son frecuentes las líneas de presión de color amarillo en LPP, birrefringentes, de composición arcillosa o limo-carbonáticas sin birrefringencia, fracturadas y translocadas; son frecuentes los hiporrevestimientos de empobrecimiento de calcio asociados a huecos o componentes orgánicos.

En la sección delgada del segundo horizonte son abundantes los revestimientos típicos e hiporrevestimientos de micrita o microesparita menores a 20  $\mu\text{m}$ , presentes en los huecos; abundan los revestimientos típicos y paralelos de yeso lenticular o de yeso microcristalino en fisuras.

En la sección delgada del tercer horizonte son raros los revestimientos típicos de materia orgánica, de color pardo y tamaño menor a 20  $\mu\text{m}$ ; son frecuentes los

revestimientos típicos de microesparita con espesor menor a 20  $\mu\text{m}$ ; son raros los revestimientos típicos de micrita de 30  $\mu\text{m}$  de grosor; son frecuentes los revestimientos radiales de yeso lenticular de tamaño menor a 20  $\mu\text{m}$ , birrefringentes; son frecuentes los hiporrevestimientos de empobrecimiento en islas, con fábrica-b granoestriada.

En la lámina delgada del cuarto horizonte son frecuentes los revestimientos típicos de yeso indentado, o euhedral dispuestos en forma radial o paralela, tamaño entre 60 y 150  $\mu\text{m}$ , con líneas de polvo horizontales; son frecuentes los revestimientos típicos de microesparita, birrefringente y de tamaño menor a 20  $\mu\text{m}$ ; son abundantes los hiporrevestimientos de empobrecimiento en islas, con fábrica grano estriada (Figura IV.154 y IV.155); son raros los revestimientos típicos limo arcillosos sobre minerales.

**P14.C.5.2. Rellenos.** En el primer horizonte son frecuentes los rellenos sueltos continuos o discontinuos de 5 mm de color pardo y gris de masa basal, nódulos carbonáticos, y granos de cuarzo y calcita, presentes en prácticamente todas las cámaras; son frecuentes los suelto discontinuo de 2 mm, de color pardo, organo-mineral, subredondeados. En el segundo horizonte son frecuentes los denso completo de yeso lenticular soldado; son raros los rellenos suelto discontinuo de microesparita o masa basal en fisuras.

En el tercer horizonte se tienen frecuentes rellenos denso completo o incompleto, principalmente en cámaras de 0.6 0.75 mm, de color pardo a gris, constituidos de yeso microcristalino, microesparita dispersa y materia orgánica; son frecuentes los suelto continuo menores a 5 mm, en cámaras, constituidos por agregados subredondeados de composición y color variado, algunos son nódulos carbonáticos, otros son de yeso microcristalino.

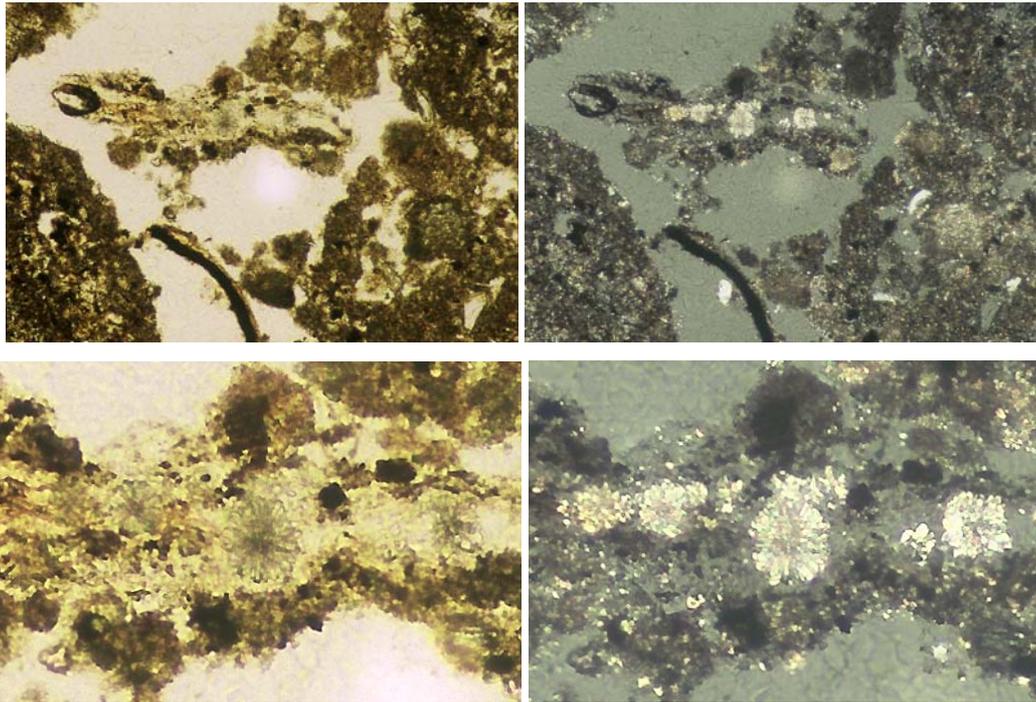
En el cuarto horizonte son frecuentes los rellenos densos completos de 0.1 a 0.4 mm de diámetro constituidos de yeso lenticular euhedral y masa basal; son frecuentes los suelto discontinuo de 30 a 220  $\mu\text{m}$  subredondeados en cámaras y canales, consistentes de masa basal limo-arcillosa de color amarillo en luz paralela plana y gris en nícoles cruzados, algunos con hiporrevestimiento de empobrecimiento, y otros son de yeso microcristalino de 100 a 400  $\mu\text{m}$  (Figuras IV.156 a IV.159); son frecuentes los rellenos denso completo de yeso lenticular parcial o totalmente soldado.

**P14.C.5.3. Nódulos.** En el horizonte superficial son muy abundantes (25 %) los nódulos carbonáticos órticos típico, radiales o concéntricos (Figuras IV.160 y IV.163), su tamaño varía de 90 a 225  $\mu\text{m}$ , se presentan en forma suelta o en agregados constituyendo un nódulo mayor (1.0 mm); otros nódulos son órticos típicos pardos (0.5 a 2.8 mm), redondeados a ovalados, sin o totalmente descalcificados, de naturaleza calcita microesparítica, y con fábrica interna vesicular; son frecuentes los nódulos órticos típicos (40 a 60  $\mu\text{m}$ ) de moderada a fuerte impregnación, de color pardo oscuro a pardo rojizo, amorfos.

En el segundo horizonte no hay nódulos. En el tercer horizonte hay un 10 % de nódulos carbonáticos, son abundantes los disórticos típicos y radiales con tamaño de 30 a 65  $\mu\text{m}$ , presentes en forma aislada o en nódulos de 1.0 mm (Figuras IV.164 y IV.165); son frecuentes los nódulos órticos (0.1 a 0.5 mm) de yeso indentado; son frecuentes los nódulos órticos típicos de yeso microcristalino algunos redondeados (0.07 – 0.225  $\mu\text{m}$ ) y otros amorfos (1 - 2 mm); son frecuentes los nódulos órticos típicos (< 80  $\mu\text{m}$ ) limo arcillosos, de color amarillo rojizo, birrefringentes en las partes descalcificadas; otros nódulos órticos típicos orgánicos (0.3 a 1.8 mm) son subredondeados y de color pardo.

En lámina delgada del cuarto horizonte hay un nódulo órtico típico de 1.0 mm de diámetro, agregado y compuesto por microesparita, yeso lenticular hipidiomórfico de 90  $\mu\text{m}$ , y por calcita de aspecto transparente. Son frecuentes los nódulos órticos típicos de yeso microcristalino con tamaño inferior a 0.5 mm; otros nódulos son de yeso indentado y tamaño de 0.1 a 0.7 mm; son raros los nódulos órticos de materia orgánica (desde < 20 a 100  $\mu\text{m}$ ) de mediana a fuerte impregnación sobre yeso microcristalino e islas (Figuras IV.166 y IV.167).

**P14.C.6. Excrementos.** En el primer horizonte son frecuentes las deyecciones esferoidales de 30  $\mu\text{m}$  de diámetro o menores (Figuras IV.168 a IV.171) correspondiendo a oribátidos, son de color pardo muy oscuro; son raros los excrementos (0.4 mm) de color pardo, con fábrica cristalítica microesparítica, posiblemente sean de larvas de *Adelidae* o *Bibionidae*. En el tercer horizonte son frecuentes los excrementos de oribátidos de tamaño menor a 20  $\mu\text{m}$ . En las láminas delgadas del segundo y cuarto horizonte no hay excrementos.



Figuras IV.148, LPP y IV.149, LPC. Esferulitas asociadas a componente orgánico. Lado mayor del primer par 0.55 mm.

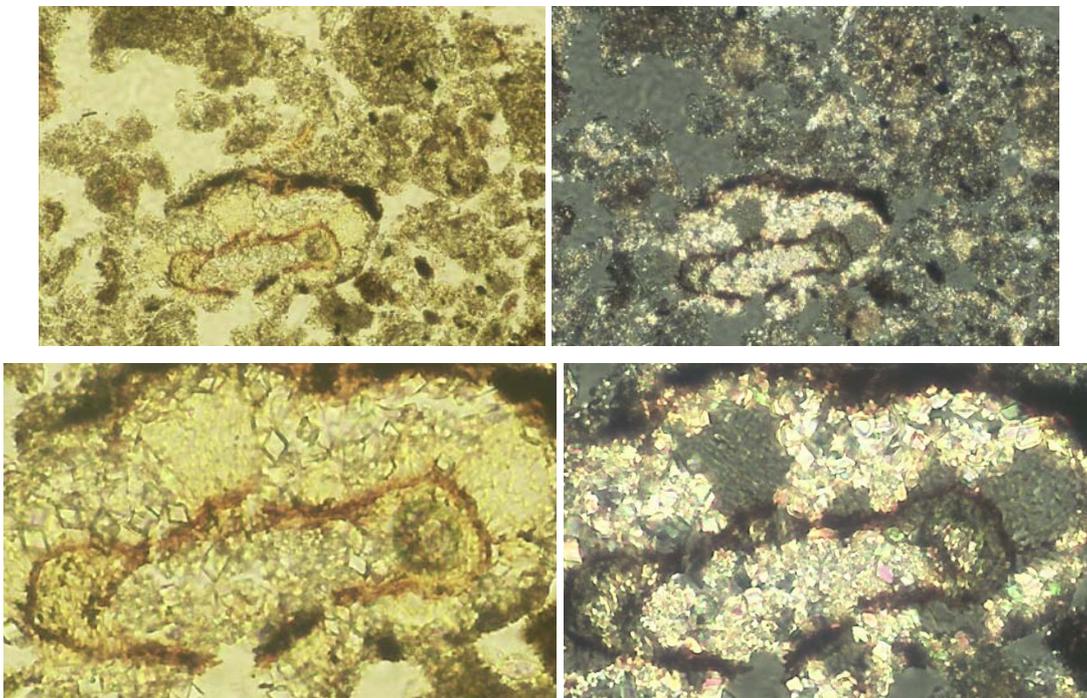
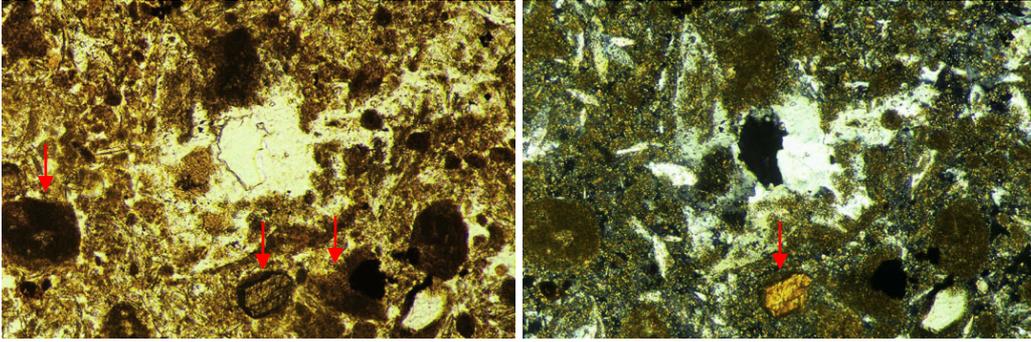
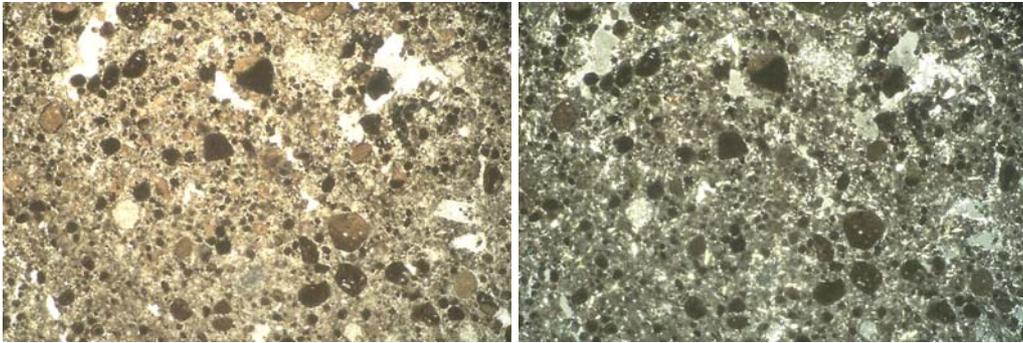


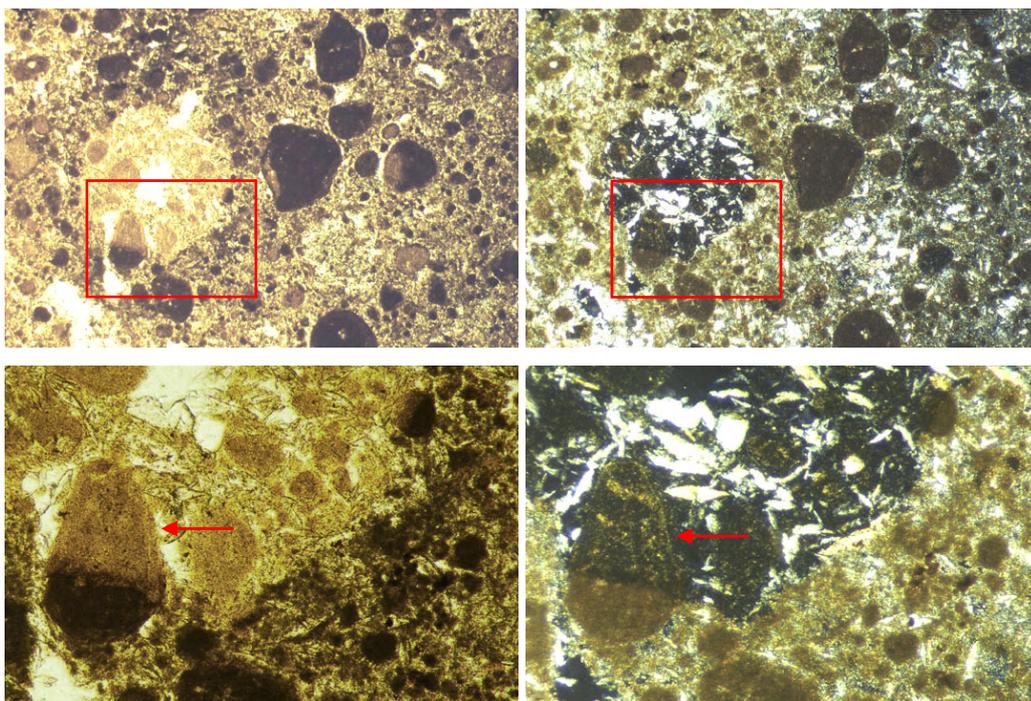
Figura IV.150, LPP y IV.151, LPC. Oxalato de calcio, posiblemente whewelita.. Lado mayor 0.55 mm.



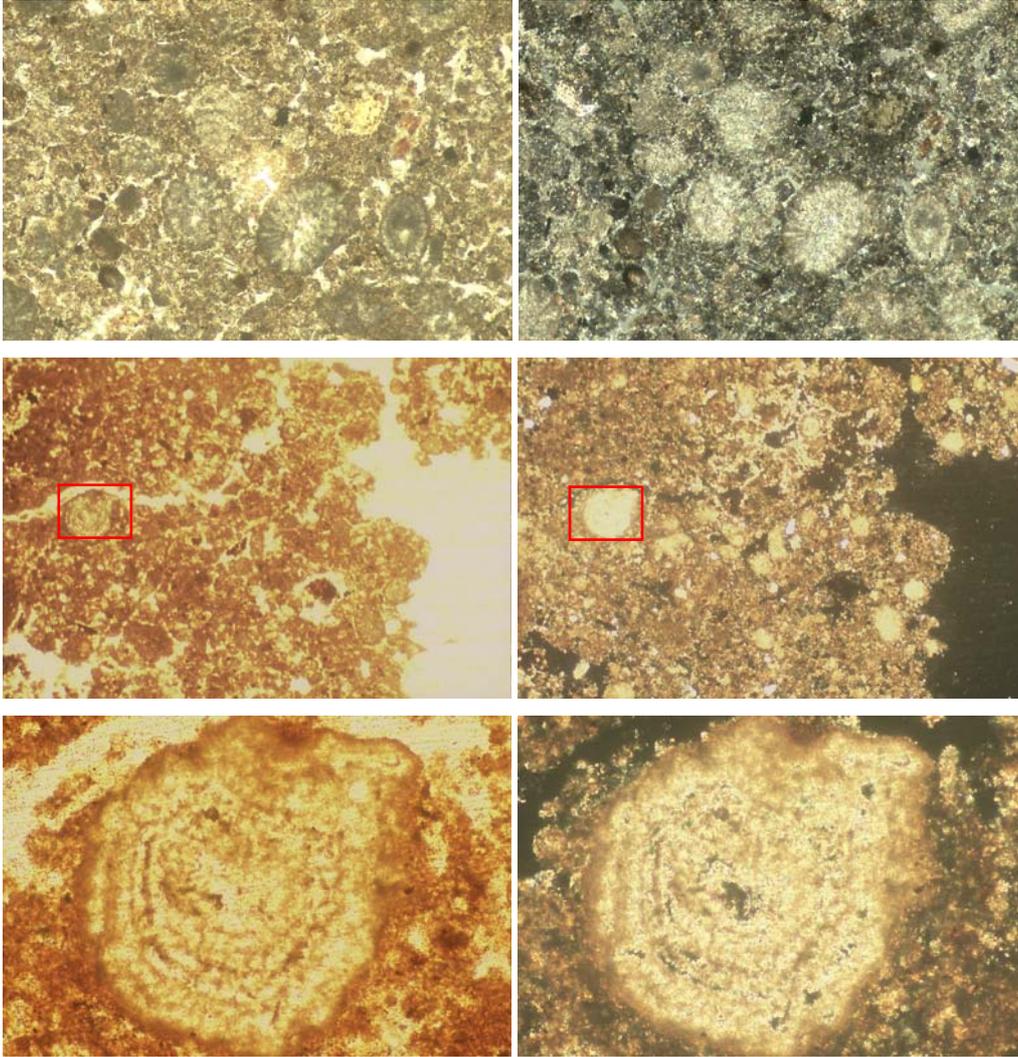
Figuras IV.152, LPP y IV.153, LPC. Grano de biotita e islas limo carbonáticas parcialmente descalcificadas, rasgo denominado también hiporrevestimiento de empobrecimiento. Lado mayor 1.09 mm.



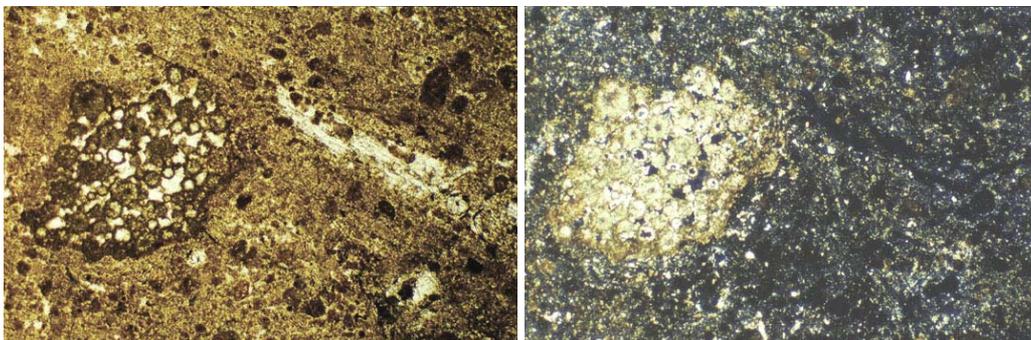
Figuras IV.154, LPP y IV.155, LPC. Nódulos de yeso microcristalino y limo arcillosos, los últimos parcial o totalmente descalcificados (hiporrevestimiento de empobrecimiento) y birrefringentes. Organización en islas. Horizonte: 5-10 cm. Lado mayor 6.8 mm.



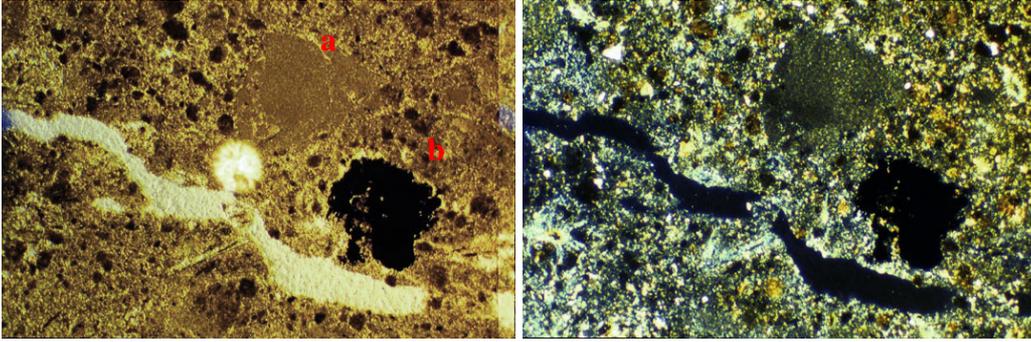
Figuras IV.156, LPP a IV.159, LPC. Relleno con nódulos de yeso microcristalino, yeso lenticular y material hospedante con hiporrevestimientos de empobrecimiento en la parte que está dentro del hueso. Lado mayor 6.8 y 1.09 mm.



Figuras IV.160, LPP a IV.163, LPC. Nódulos disórticos típicos, radiales, y concéntricos (concreciones para Brewer, 1976). Lado mayor del primer par 3.4 y 6.8 mm del segundo.



Figuras IV.164, LPP a IV.165, LPC. Nódulo agregado disórtico. Lado mayor 6.8 mm.



Figuras IV.166, LPP a IV.167, LPC. (a) Nódulo de yeso microcristalino y (b) nódulo fuertemente impregnativo, posiblemente de manganeso. Lado mayor 3.4 mm.

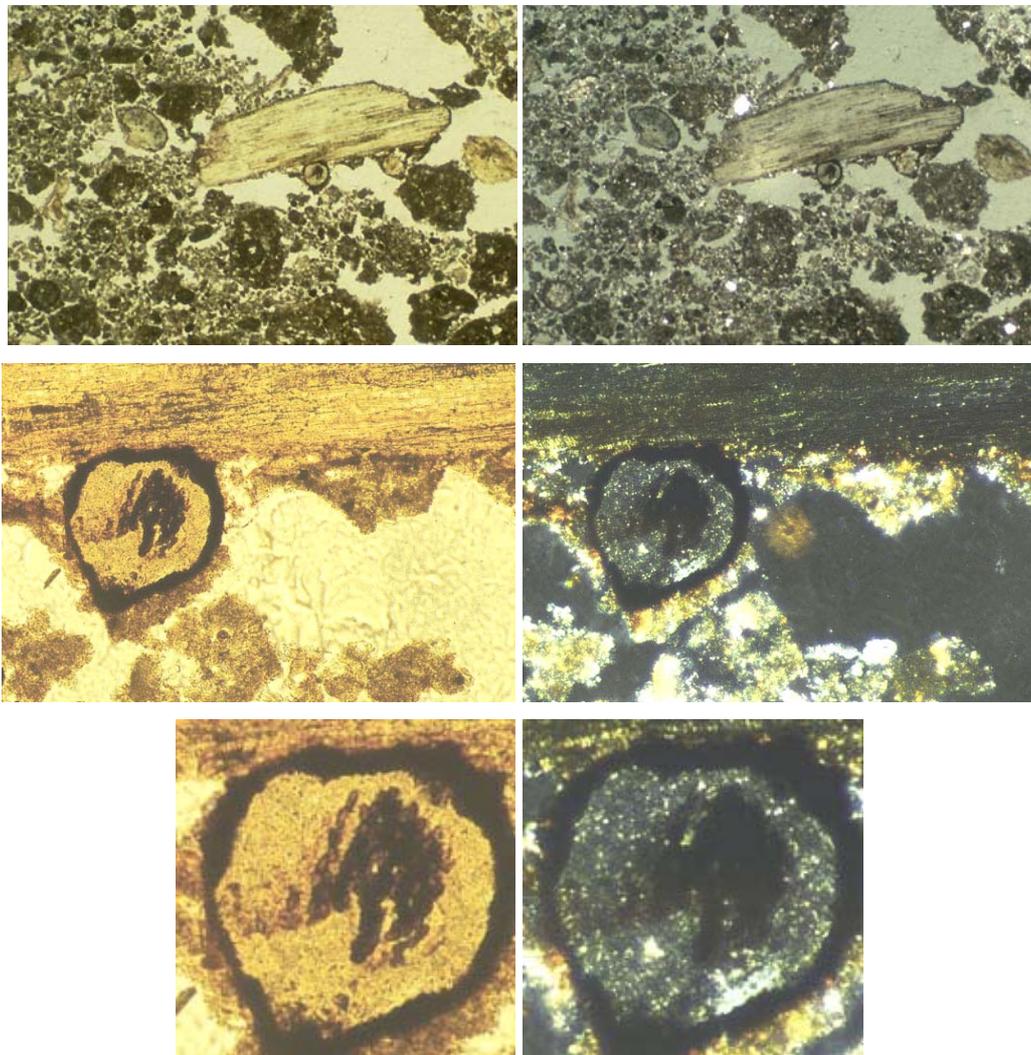


Figura IV.168, LPP a IV.171, LPC. Excrementos flobafenizados de oribátidos, dispuestos en cadena o sueltos, asociados a componente orgánico. Lado mayor 3.4 y 0.55 mm.

**Perfil P16.**

**P16A. Clasificación y características del sitio.**

Soil Survey Staff, 1999: Haplogypsis léptico, limoso grueso, gypsico, térmico.

WRB, 1999: Gipsisol hipergípsico, hiposódico.

Uso: Apacentamiento. Colonia de perrito de la pradera (*Cynomis mexicanus*).

Relieve: Plano con ondulaciones centimétricas.

Flora: Mezquite (*Prosopis glandulosa*), nopales (*Opuntia* sp), pasto gipsófilo (*Bouteloua chasei*).

Erosión: Laminar moderada.



Figuras IV.172 y IV.173. Sitio y Perfil P16. Colonia activa de perrito de la pradera. Pastizal gipsófilo y matorral desértico. Yeso farinoso.

**P16.B. Descripción macromorfológica.**

A. 0 – 12 cm. Color blanco en seco (10YR 8/1) y pardo muy pálido en húmedo (10 YR 8/3). Franco limoso. Estructura masiva con tendencia a bloques subangulares débiles. Consistencia en seco suave, en húmedo friable y en saturado no plástico y no adherente. Raíces finas y muy finas comunes. Muchos poros finos y muy finos. Poca reacción al HCl 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Muy permeable y con buen drenaje. Sin piedras. No se observa actividad de fauna. Transición media y límite ondulado.

A2. 12 –25 cm. Color gris tenue en seco (10 YR 7/2) y pardo pálido en húmedo (10YR 6.5/3). Franco limoso con un poco de gravilla. Estructura masiva con tendencia a bloques subangulares débiles. Consistencia ligeramente más suave que en el

primer horizonte en seco, friable en húmedo y no plástico y no adherente en saturado. Raíces finas y muy finas pocas. Poros finos y muy finos muchos. Fuerte reacción al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Muy permeable. Bien drenado. Sin pedregosidad. Sin vestigios de fauna. Transición media y límite ondulado.

Y. 25 – 35 cm. Color blanco en seco (10YR 8/2) y pardo muy pálido en húmedo (10YR 7/4). Franco limoso con mucha gravilla. Estructura masiva con tendencia a bloques subangulares débiles. Consistencia muy dura en seco, dura en húmedo y no plástico no adherente en saturado. No hay presencia de raíces. Poros finos y muy finos comunes. Muy poca reacción al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Permeable. Bien drenado. No pedregoso. Sin indicios de actividad de fauna.

Tabla IV.11. Resultados de los análisis físicos y químicos, Pedión P16.

Profundidad cm	Horizonte	Tamaño de partículas, %			pH H <sub>2</sub> O 1:2.5	MO %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/kg suelo	CEes dS/m 25 °C	Cationes solubles mmol/l extracto				RAS
		Ar	L	Ac					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
		0-12	A	27.8	64.6	7.6	7.8	1.02	8.1	2.4			
12-25	A2				8.1	1.02	7.9	2.9					
25-35	Y				8.4	0.18	7.7	2.9					

Profundidad cm	Horizonte	CaCO <sub>3</sub> Total %	Yeso %	CIC cmol/kg suelo	Cationes intercambiables, cmol/kg suelo				PSI	Da g/cc
					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>		
		0-12	A	5.3	4.7	34.4	31.4	1.8	0.4	0.8
12-25	A2	5.8	25.0	14.9	12.1	1.2	0.6	1.0	6.7	1.4
25-35	Y	2.1	63.0	17.4	15.3	0.8	0.3	1.0	5.7	1.6

#### P16.C. Descripción micromorfológica.

Perfil sin láminas delgadas.

#### **D. Interpretación.**

De los cuatro perfiles con secciones delgadas (P7, P11, P14) se analizan varios aspectos, tales como la microestructura, inclusiones en yeso lenticular, formación de horizonte petrogíptico, revestimientos, nódulos, entre otros.

Los cuatro perfiles son similares en cuanto a la débil pedialidad del horizonte superficial. En cambio difieren en los demás horizontes, así P7 a partir del segundo horizonte la estructura masiva con tendencia laminar y en los perfiles P11 y P14 es laminar. También existen algunas diferencias en cuanto a la microestructura del primer horizonte, por ejemplo en el pedión P14 es granular compleja con cámaras y nódulos carbonáticos, y en los otros perfiles es masiva laminar con vesículas.

En los tres perfiles predomina el yeso lenticular idiomórfico. El hábito hipidiomórfico y xenomórfico se presenta a manera de nódulos o revestimientos radiales o en empalizada, principalmente en los perfiles del Altiplano, siendo poco frecuente en el horizonte superficial e incrementándose con la profundidad. Otro hábito del yeso es en punta de flecha o cola de golondrina, sobre todo en el perfil P7, Zona Media.

El proceso de disolución - recristalización es importante en estos suelos, ya que se observan fragmentaciones de los cristales de yeso más grandes a favor de las inclusiones o planos de exfoliación, de este proceso resultan cristales cuasilenticulares (Artieda, 1996) con dos lados rectos (Figura IV.114). También es frecuente encontrar granos de yeso con acreciones por los costados (Figuras IV.115 y IV.116) y con bordes longitudinales ondulados debido a la disolución con posibles desprendimientos de granos de yeso lenticular (Benayas *et al.*, 1988) o por incisiones de crecimiento (Porta, 1986). Otro indicador de la formación del yeso es la presencia de nódulos órticos o disórticos de yeso microcristalino o lenticular, así como los revestimientos en huecos.

Son comunes los granos de yeso con inclusiones de materiales finos. Éstas se presentan en forma de líneas de polvo o áreas de constitución calcítica micrítica (Figuras IV.117 y IV.118), o arcillosas (Figuras IV.119 y IV.120). No se tienen datos de DR-X para P7. En los pediones P5 y P8 ubicados en la misma llanura que P7, por DR-X se identificó montmorillonita, por lo que dichas inclusiones podrían ser de esta naturaleza.

En cuanto al efecto o importancia del yeso en el desarrollo de las plantas, además de los problemas de baja fertilidad, poca retención de agua, compactación, entre otros se tiene la acción mecánica o física del yeso directamente sobre la raíz, la cual presenta revestimientos de yeso lenticular (Figuras IV.127 y IV.128) que pueden obstruir la absorción de nutrimentos o de agua, o el intercambio gaseoso. En relación al contenido del yeso, Smith y Robertson (1962) reportan que en suelos con 250 g/kg de yeso y sin compactación, el crecimiento de la raíz de las plantas de trigo se ve inhibido o impedido, lo mismo sucede con plantas de algodón (Boyadgiev, 1974; citado por Poch y Verplancke, 1997) o de árboles como pino y eucalipto (Mardoud, 1981).

Un rasgo muy importante respecto a los procesos edafogénicos son las zonas con descalcificación o hiporrevestimientos de empobrecimiento, no presentes en P7, pero sí en P11 y P14. Las áreas de descalcificación no tienen la estructura de canales o huecos alargados reportada por Bullock *et al.*, (1985), Herrero (1991) y Artieda (1996). Las de los perfiles P11 y P14 consisten de masas densas con fábrica interna grano estriada o estriada cruzada debida posiblemente a arcillas. Estas zonas parcial o totalmente descalcificadas se presentan incluso en agregados o “islas” de masa basal (Figuras IV.142, IV.143, IV.154 a IV.159). No todas las áreas descalcificadas están asociadas a esparita, el que no esté recristalizando carbonato de calcio puede indicar que estos compuestos se estén acumulando en otro horizonte o que están siendo lavados, también puede intervenir en la formación de yeso.

Estas descalcificaciones se puede deber tanto a la actividad de las plantas como a la entrada de agua de lluvia a través de los huecos, la cual diluye la solución del suelo provocando la disolución de los materiales carbonatados. La acción del agua se aprecia en forma clara en la Figuras IV.156 a IV.159, dentro del hueco los nódulos arcilloso-carbonáticos están totalmente descalcificados, en cambio uno de ellos solamente está descalcificado en la parte que tiene dentro del hueco, y la parte inmersa en la masa basal no la presenta. El calcio que se está perdiendo se está lixiviando o puede participar en la formación del yeso lenticular presente en dicho hueco, ya que como señalan Eswaran y Zi-Tong (1991) el proceso de descalcificación suele estar acompañado por la formación de yeso.

En P14 la cantidad de nódulos carbonáticos es mayor al 20 %, la mayoría son típicos, concéntricos y radial (Figuras IV.160 a IV.163). Los últimos corresponden a esferulitas del tipo A de Verrecchia *et al.* (1995), algunas están asociadas a compuestos orgánicos y su tamaño (90 a 225  $\mu\text{m}$ ) es mayor a las del perfil P10 (50 a 125  $\mu\text{m}$ ). Los nódulos se presentan en forma suelta o en agregados (Figuras IV.164 y IV.165) que puede ser mayor a 1.0 mm. La mayor cantidad de nódulos puede indicar que este suelo presenta un mayor grado de formación de costra que P10, constatado tanto por su abundancia como por su mayor tamaño.

Las grietas o fracturas presentes en la roca en P14 y que permiten la entrada de material del primer horizonte a manera de bolsas, se pueden deber a la formación de yeso microcristalino iniciando en los planos de debilidad preexistentes. Artieda (1996) dice que el yeso farináceo puede dislocar estratos de calizas y encuentra lajas calizas subverticales rodeadas de yeso farináceo o en “ensaimada” (según la Real Academia Española es un bollo hojaldrado con relleno, el hojaldrado serían las capas de caliza y el relleno el yeso farináceo). En el perfil P14 por dureza no se profundizó lo suficiente como para saber si está pasando algo similar a lo que plantea el anterior autor. Es posible que la formación del yeso farináceo esté separando las rocas, dado que después del primer horizonte las piedras generalmente alargadas (de hasta 65 cm) y en posición horizontal están separadas por suelo, sin embargo es necesario un estudio detallado explorando a mayor profundidad para aclarar esta situación.

En el perfil P11 es posible que se esté formando, o que a profundidad exista, un horizonte petrogíptico, dado que el horizonte inferior es muy duro en seco pero quebradizo y en secciones delgadas presenta estructura laminar con vesículas, revestimientos de yeso en forma radial o en empalizada en huecos fisura y vesículas (Figuras IV.140 y IV.141) característicos de horizonte petrogíptico. En las Figuras anteriores se muestran revestimientos de yeso tipo colgante o yeso geopetal, cuyo tamaño identificado en campo fue de 5 mm.

**5.3.2. Suelos con horizonte yesoso somero, fase salina.** En esta posición se incluyen los pediones P1, P6 y P8. Se caracterizan por relieve general plano con microdepresiones, generalmente centimétricas. También tienen en común la salinidad, la cual varía de moderada (P1) a muy fuerte (P6 y P8).

El pedión P1 se localiza en la propiedad privada La Concepción, aproximadamente a 5 000 m al noreste de Rioverde, en el municipio de Ciudad Fernández. Este perfil se ubica en una depresión centimétrica (Figuras IV.174 y IV.175) y se caracteriza por tener un horizonte con material amorfo, posiblemente ceniza volcánica y presencia de sepiolita. El pedión P6 se sitúa a 500 m al suroeste del poblado Granja Militar La Gavia en el Llano Pionia. El P8 se ubica a 3 000 m al este de Santo Domingo en el Llano de Huichapan, ambos en el municipio de Villa Juárez.

El área del pedión P8 es más húmeda, tal como se constató durante la descripción de los perfiles, variando de húmedo a cercano a saturación en la época de muestreo. Es probable que en P8 haya influencia de ascenso del nivel freático, ya que en las cercanías existe un pozo (por comentarios de los pobladores de Santo Domingo, Villa Juárez) para regadío que en algunos años se convierte en artesiano, y los dueños se ven en la necesidad de eliminar el exceso de agua tal como se aprecia en la Figura IV.176. El P8 se sitúa a unos 300 metros de dicho canal. Además, el P8 puede tener influencia de manto freático debido a su cercanía (15 m) a agua acumulada en una excavación para extracción de material. Sin embargo, para saber lo que sucede es necesario un estudio del comportamiento del nivel freático en esta área o geoforma.



Figuras IV.174 y IV.175. Llanura con microdepresiones. Las áreas con colores claros (a) tienden a estar ligeramente (a veces de cm) más elevadas que las oscuras (b), y por lo general son más yesosas, se endurecen más y el desarrollo de los cultivos es menor. El cultivo de la primera fotografía es maíz y el de la otras zábila (*Aloe vera*).



Figura IV.176. Canal sobre terreno yesoso para drenar el exceso de agua proveniente de pozo artesiano estacional en las cercanías del pedión P8, Santo Domingo, Villa Juárez. La foto corresponde a la época de lluvias.

**Perfil P1.**

**P1.A. Clasificación y características del sitio.**

USDA, 1999: Haplogypsis léptico, limoso grueso, gypsico, térmico.

WRB, 1999: Gipsisol hipergípsico, hiposálico, hiposódico.

Uso: Agricultura de riego, cultivos de maíz y alfalfa.

Relieve: Plano con microdepresiones.

Flora: En los alrededores hay mezquite (*Prosopis laevigata*), huizache (*Acacia sp*), nopal (*Opuntia sp*) y pastizal.

Erosión: Laminar.



Figuras IV.177 y IV.178. Sitio y perfil P1. Cultivo de maíz en primer plano y al fondo alfalfa.

**P1.B. Descripción macromorfológica.**

Ap. Profundidad 0 – 24/26 cm. Color en seco 10YR7/2 y en húmedo 10YR5/2. Textura franco arcillo limoso con gravilla. Consistencia en seco suelta y en saturado pegajoso y plástico. Estructura granular de 3 cm o menor. Raíces medianas y finas pocas. Pocos poros canales. Reacción fuerte al HCl al 10 % y muy ligera al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Sin piedras. Presencia de algunas larvas. Transición marcada y límite horizontal.

- Abyz. Profundidad 24/26 – 38/46 cm. Color en seco 10YR 3/1 y en húmedo 10YR 2/1. Franco limoso. Consistencia en seco ligeramente blando y en saturado no plástico ni pegajoso. Estructura bloques subangulares aproximadamente de 3 cm bien desarrollados. Raíces finas pocas. Poros fisuras, aproximadamente de 1.0 mm de diámetro. Reacción fuerte al HCl al 10 % y muy ligera al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Presencia de algunas larvas. Abundantes poros intra e interagregados con relleno blanco, con color en seco 10YR 8/1, de forma tubular y granular, blandos sin reacción al HCl, correspondiente a yeso vermiforme. Presenta ligera tixotropía. Posiblemente sea ceniza volcánica transportada por el viento o agua y atrapada en la depresión. Transición media y límite ondulado.
- Abyz2. Profundidad 38/46 – 52/63 cm. Color en seco 10YR7.5/2 y en húmedo 10YR7/3. Franco limoso con gravilla. Consistencia en seco duro y en saturado plástico y pegajoso. Estructura ligeramente desarrollada, laminar tendiendo a bloques subangulares. Raíces finas raras. Poros fisuras rellenas. Reacción fuerte al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Buen drenaje. Presencia de larvas. Raíces entre las láminas. Transición media y límite ondulado.
- Y1. Profundidad 52/63 – 90 cm. Color en seco 10YR7.5/2 y en húmedo 10YR8/3. Limoso con gravilla. Consistencia en seco blando a ligeramente duro y en saturado pegajoso y plástico. Permeable. Estructura laminar pobremente desarrollada. Sin raíces. Rellenos con restos de vegetación. Leve reacción al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Presencia de cristales dispuestos en forma de bandas (“veta”). Transición tenue y límite horizontal.
- Y2. Profundidad 90-135 cm. Color en seco 10YR8/2 y en húmedo 10YR8/3. Franco limoso. Consistencia en seco blando y en saturado pegajoso. Estructura laminar pobremente desarrollada. Permeable. Sin raíces activas. En poros restos de actividad de raíces a manera de relleno. Reacción fuerte al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Presencia de cristales dispuestos en forma de bandas o “vetas”.

Tabla IV.12. Resultados de los análisis físicos, químicos y mineralógicos, Pedión P1.

Profundidad cm	Horizonte	Tamaño de partículas, %			pH H <sub>2</sub> O 1:2.5	MO %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/kg suelo	CEes dS/m 25 °C	Cationes solubles mmol/l extracto				RAS
		Ar	L	Ac					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
24/26-38/46	Abyz1				7.6	5.2	186	8.44	25.64	57.47	0.06	21.28	3.3
38/46-52/63	Abyz2				8.2	3.2	72	9.82	24.66	49.20	0.08	40.00	5.6
52/63-90	Y1				8.5	0.16	>1	4.35	24.70	24.40	0.16	8.07	1.6
> 90	Y2				8.4	0.16	<1	3.01	23.50	12.80	0.20	5.00	1.2

Profundidad cm	Horizonte	CaCO <sub>3</sub>		CIC cmol <sub>c</sub> /kg suelo	Cationes intercambiables, cmol <sub>c</sub> /kg suelo				PSI	Da, g/cc
		Total %	Yeso %		Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>		
24/26-38/46	Abyz1	6.2	28.0	36	24.19	10.0	0.11	1.70	4.7	1.02
38/46-52/63	Abyz2	5.0	33.0	28	15.63	10.5	0.07	1.80	6.4	1.17
52/63-90	Y1	5.5	46.0	18	14.73	2.7	0.07	0.50	2.8	1.27
> 90	Y2	1.5	64.0	26	24.08	1.6	0.07	0.25	0.3	1.34

**Mineralogía, en orden decreciente de concentración relativa, DR-X**

0-24	Ap	Yeso, sepiolita, calcita
24-43	Abyz	Yeso, sepiolita, calcita, cuarzo‡
90-135	Y2	Yeso

‡ Mineral en muy baja proporción en relación al resto de los minerales.

### P1.C. Descripción micromorfológica

**P1.C.1. Microestructura.** En el primer horizonte la estructura está bien desarrollada, y corresponde a bloques subangulares parcialmente acomodados y granular compuesta. Los agregados más grandes están constituidos por otros menores a 5 mm, esféricos y subredondeados, en este caso la estructura es granular compuesta.

La lámina que representa a la profundidad 33-43 cm hay estructura compleja y corresponde a la transición entre el segundo y tercer horizonte. El primer tercio de la sección delgada tiene estructura de bloques angulares parcialmente acomodados (0.8-1.5 cm) con fábrica interna vesicular. Los agregados están integrados por numerosos nódulos tanto carbonáticos como de yeso microcristalino u orgánico - mineral. El segundo tercio tiene organización en islotes ( $\leq 8$  mm) y en el último la estructura es laminar con cavidades en algunas áreas (Figuras IV.179).

Las islas (100 a 2800  $\mu\text{m}$ ) son esferoidales, redondeadas, de color pardo amarillento en LPP, con abundantes cristales máficos y algunos con cristales de yeso, sobre todo a mayor profundidad. Las islas más grandes tienen fábrica grano-estriada, muchos de ellos con algún grado de descalcificación.

A partir de los 50 cm (cuarto y quinto horizontes) la estructura cambia a laminar con vesículas y cámaras, siendo más evidente a mayor profundidad (100 cm). En esta profundidad la estructura está débilmente desarrollada. En el último horizonte se presentan bandas de yeso lenticular equigranular, que le da el aspecto de laminar.

En el primer horizonte existen clastos sedimentarios con gradación del tamaño de agregados (de finos a gruesos), algunos con acomodación laminar, bandas con diferente tamaño de gránulos. La parte más fina es ondulada (Figuras IV.180 y IV.181). Dichos clastos han sido translocados principalmente por la acción de los implementos agrícolas, ya que se trata de un suelo dedicado a la actividad agrícola.

**P1.C.2. Huecos.** En el primer horizonte la porosidad es del 35 %, corresponden principalmente a fisuras de 0.1 a 3 mm (15 %), poros de empaquetamiento compuesto (10 %, 50  $\mu\text{m}$ ), vesículas (5 %, 200  $\mu\text{m}$ ) y canales (2 %, 300  $\mu\text{m}$ ) y cámaras (3 %, 5 mm) con paredes lisas y onduladas debido a los cristales de yeso lenticular. En el segundo y tercer horizonte predominan los poros de empaquetamiento con un 20 % (50 – 400  $\mu\text{m}$ ), luego están las fisuras con un 8 % (150 – 900  $\mu\text{m}$ ), las cámaras de paredes lisas con un 4 % (250 - 400  $\mu\text{m}$ ), los canales de paredes lisas con un 2 % (300  $\mu\text{m}$ ) y vesículas con un 1 % (150 – 400  $\mu\text{m}$ ). La microestructura es de bloques subangulares y granular.

En el cuarto horizonte la porosidad es del 25 %. Predominan las fisuras (10 %,  $\leq 200$   $\mu\text{m}$ ) horizontales, le sigue en importancia las vesículas (8 %, 250  $\mu\text{m}$ ), canales (3 %, 1-3 mm), cámaras con un 3 % ( $\leq 0.8$  mm), y cavidades (1 %,  $\leq 1.4$  mm). Todos los huecos con paredes lisas a serradas debido al yeso. La microestructura es laminar con vesículas.

En el quinto horizonte la porosidad es del 20 %. Predominan las fisuras (10 %, 50-500  $\mu\text{m}$ ) horizontales. Las vesículas conforman el 5 % (75-450  $\mu\text{m}$ ). Las cámaras representan el 3 % ( $\leq 0.8$  mm) y los canales un 2 % (1.3-2.4 mm). La pared serrada de los huecos se debe al yeso. La microestructura es laminar con vesículas.

**P1.C.3. Componentes orgánicos.** En el primer horizonte consisten de raíces (1 %, 250  $\mu\text{m}$ ) frescas o parcialmente flobafenizadas, y en las que se aprecia el contorno celular, color gris pálido en LPP y amarillo ocre en LPC. También hay esporas en agregado botroidal (Figuras IV.182 y IV.183), hifas, y restos de ostrácodos birrefringentes. En el segundo horizonte hay menos raíces ( $< 1$  %, 0.8-2.5 mm), parcialmente flobafenizadas y en las que se aprecia la estructura celular, son de color pardo oscuro o muy oscuro en LPP y rojizas en LPP, la mayoría asociadas a yeso microcristalino. Las hifas se asocian a yeso microcristalino.

En el tercer horizonte los componentes orgánicos son muy pocos y solamente existen algunas raicillas flobafenizadas de tamaño arena muy fina (75  $\mu\text{m}$ ), de color amarillo ocre en LPC, asociadas a yeso microcristalino. En el último horizonte desaparecen las raíces y se presentan numerosos bioclastos carbonatados birrefringentes de hasta 6 mm de largo, posiblemente corresponden a fragmentos de esqueletos de ostrácodos. También se presentan valvas de anélidos (MacKenzie y Adams, 1997), birrefringentes de color amarillo (Figura IV.184).

Hay actividad de lombrices en todo el perfil, la estructura arqueada típica de estos organismos se presenta está constituida básicamente de yeso lenticular. Edaforrasgo de fábrica debida a la actividad de lombrices.

#### **P1.C.4. Masa basal**

**P1.C.4.1. Material grueso.** En el primer horizonte la relación grueso/fino es de 2/3, y el componente principal es yeso lenticular (30 %, 20 a 100  $\mu\text{m}$ ) inequigranular, paralelo a huecos y agregados; el 2 % es cuarzo (50 a 80  $\mu\text{m}$ ) mal clasificado, límpido. La microesparita y esparita se presentan en porcentaje aproximado al 5 % (Figuras IV.185 y IV.186). Los minerales máficos constituyen el 3 %, (20 – 100  $\mu\text{m}$ ). Ocasionalmente se encuentra olivino. La distribución relativa g/f es porfírica abierta.

En mitad superior de la segunda lámina (35 – 45 cm) la relación grueso/fino es 1.5/8.5 y en mitad inferior es 2/1. En la parte superior predomina el yeso lenticular (10 %, 20 a 100  $\mu\text{m}$ ); le siguen en importancia los minerales máficos (3 %, 20 – 100  $\mu\text{m}$ ), la calcita (1 % 60-90  $\mu\text{m}$ ) con distribución aleatoria y sin orientación. También hay calcita pseudomorfa en tejido orgánico muy flobafenizado y en pseudomorfos lenticulares (Figuras IV.187 y IV.188) inmersos en nódulos. El cuarzo constituye el 1 % (50 a 80  $\mu\text{m}$ ). La distribución relativa es porfírica abierta. La segunda mitad de la lámina prácticamente es yeso lenticular (62 %) de menor tamaño menor al del primer horizonte (20-50  $\mu\text{m}$ ), con orientación paralela a huecos y a agregados. El cuarzo límpido (70  $\mu\text{m}$ ) constituye el 2 %; la calcita el 1 % (60-90  $\mu\text{m}$ ). La distribución relativa g/f es porfírica cerrada y de espacio simple.

En la lámina del cuarto horizonte la relación grueso/fino es de 2/1. Predomina el yeso lenticular inequigranular, con un 65 % y tamaño que va de 20 a 100  $\mu\text{m}$ , con distribución y orientación paralela a huecos, a agregados y a nódulos de yeso microcristalino, en las fisuras se encuentra en forma de empalizada. La calcita y el cuarzo son muy escasos (< 1 %). La distribución relativa g/f es porfírica cerrada, con ligera apariencia quitónica.

En la lámina del quinto horizonte la relación grueso/fino es 3/1. En ella el yeso lenticular inequigranular constituye prácticamente el total de gruesos (73 %), el tamaño varía de 20 a 250  $\mu\text{m}$ , con orientación fuerte, paralela a huecos, nódulos y agregados. Los cristales de yeso lenticular más grandes presentan líneas de polvo transversales. La microesparítica (< 2 %) se presenta aisladamente en algunos nódulos, mezclada con yeso lenticular e islas limo-arcillosa. La distribución relativa g/f es porfírica cerrada, con apariencia quitónica.

**P1.C.4.2. Material fino.** En el primer horizonte es pardo amarillento en LPP y gris en LPC. Está constituida por yeso, cuarzo, calcita y materia orgánica. La fábrica-b es cristalítica gípsica. En el primer tercio de la segunda lámina es de color pardo amarillento en LPP y pardo-gris en LPC, está constituida por microesparita, yeso, cuarzo, máficos y materia orgánica, la fábrica-b es microgípsica con microesparítica punteada. El resto de la lámina es amarillenta en LPP y gris en LPC, constituida

principalmente de yeso, la fábrica-b es microgípsica. En la lámina del cuarto y quinto horizonte el material fino es amarillento en LPP y gris en LPC, conformada por yeso. La fábrica-b es de yeso microcristalino o microgípsica.

#### **P1.C.5. Edaforrasgos.**

**P1.C.5.1. Revestimientos.** En el primer horizonte predominan los revestimiento típicos de materia orgánica en huecos, agregados y en cristales. Los revestimientos típicos de microesparita son muy escasos, así como los de manganeso, hiporrevestimientos de empobrecimiento en nódulos. Un revestimiento, tamaño 300  $\mu\text{m}$ , de naturaleza gípsica, de forma cilíndrica, correspondiente a un hueco fisura revestido. En el segunda lámina también predominan los revestimientos hipo y típicos de materia orgánica en huecos y agregados y van disminuyendo con la profundidad, también existen escasos hiporrevestimientos limo-carbonáticos y típicos de calcita microesparítica en huecos y agregados sin laminación (Figuras IV.187 a IV.190).

En los dos últimos horizontes predominan los revestimientos de yeso lenticular en fisuras horizontales y en vesículas (Figuras IV.190 y IV.192) y algunos huecos en empalizada. Son muy escasos los revestimientos típicos de microesparita.

**P1.C.5.2. Rellenos.** En el primer horizonte los rellenos son de yeso lenticular euedral tipo denso completo o incompleto, el tamaño va de 0.4 a 1 mm. En el segundo horizonte son abundantes los rellenos suelto continuo y denso completo de yeso microcristalino asociados a la morfología vermiforme detectada en campo (Figura IV.179) o de yeso lenticular, el tamaño va de 0.125 a 2.5 mm. Hay rellenos densos completos curvados, debidos a actividad de lombrices, de constitución organo-mineral. Algunos rellenos son de yeso microcristalino y agregados esféricos subredondeados correspondiendo a excrementos.

En el cuarto horizonte hay pocos rellenos suelto o denso incompleto de yeso lenticular 0.5 a 1.5 mm; son escasos los rellenos de yeso microcristalino; son frecuentes los rellenos densos incompletos curvados constituidos de masa basal. En el quinto horizonte son comunes los rellenos densos completos o incompletos de tamaño que va de 0.6 a 2.7 mm, conformados por yeso lenticular equigranular ( $\pm 40 \mu\text{m}$ ) de tamaño

mayor a los del horizonte anterior. Los rellenos de yeso microcristalino son muy escasos. También son frecuentes los rellenos curvados constituidos de masa basal.

**P1.C.5.3. Nódulos.** En el primer horizonte son frecuentes los nódulos disórticos típicos limo-carbonáticos (0.06-0.5 mm). Algunos nódulos son birrefringentes con fábrica interna estriada cruzada, esféricos subredondeados, pardos en LPP, con revestimientos de yeso lenticular (0.27-2.8 mm), algunos están parcialmente descalcificados. Son pocos los nódulos típicos vesiculares, de naturaleza organo-mineral, con revestimientos de esparita, fábrica grano estriada. Son frecuentes los nódulos de yeso microcristalino típicos (0.3 mm). Hay un nódulo disórtico típico de calcita pseudomorfa, es birrefringente (Figuras IV.193 y IV.194).

En el segundo horizonte son comunes los nódulos órticos limo-carbonáticos, de micrita, microesparita y esparita; los últimos son densos típicos y los de microesparita pueden ser septáricos, nucleados, típicos o dentados vesiculares. También son comunes los nódulos típicos de yeso microcristalino (0.13-0.7 mm), la mayoría presentan revestimientos de materia orgánica o hifas flobafenizadas (Figura IV.195), y en la cercanía a las estructuras orgánicas se tienen granos de yeso ligeramente más finos. Son frecuentes los nódulos arcillo-organo-mineral birrefringentes, con fábrica-b estriada o grano estriada, órticos y disórticos, tamaño de 0.28 a 1.5 mm, los más pequeños son esféricos subredondeados. Son pocos los nódulos órticos típicos esparíticos, fábrica-b grano estriada y tamaño arena media.

En el cuarto horizonte los únicos nódulos presentes son de yeso microcristalino (0.13 a 0.7 mm), son densos típicos. También existen en forma aislada islas de material arcillo-órgano-mineral descrito en la lámina anterior y de tamaño 0.03-0.8 mm. En el último horizonte solamente existen pocos nódulos típicos (0.3-0.8 mm) constituidos por yeso lenticular equigranular.

**P1.C.6. Excrementos.** En el primer horizonte son frecuentes los excrementos subsféricos de oribátidos, tamaño de 0.045 mm, flobafenizados, de color pardo oscuro y pardo rojizo en LPP. Otros menos comunes son arqueados y corresponden a lombrices. En el segundo horizonte los excrementos también corresponden a oribátidos y lombrices aunque en menor cantidad. En los horizontes cuarto y quinto ya no se

detectan excretas de oribátidos y solamente se tienen las de lombrices (Figuras IV.196 y IV.197), actividad que disminuye con la profundidad.

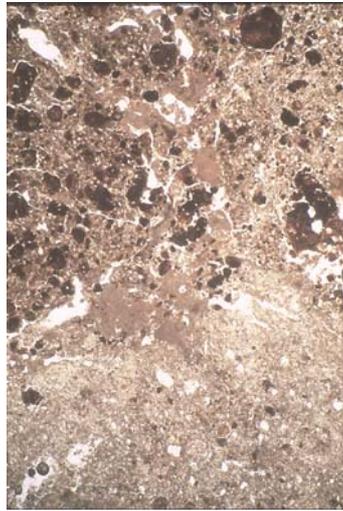
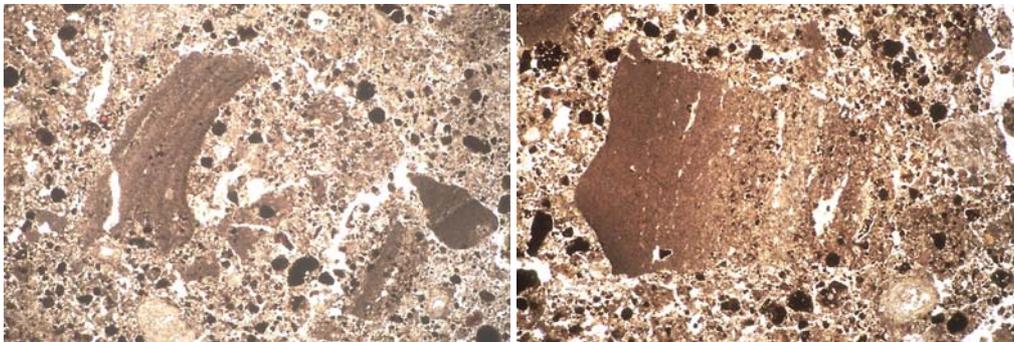
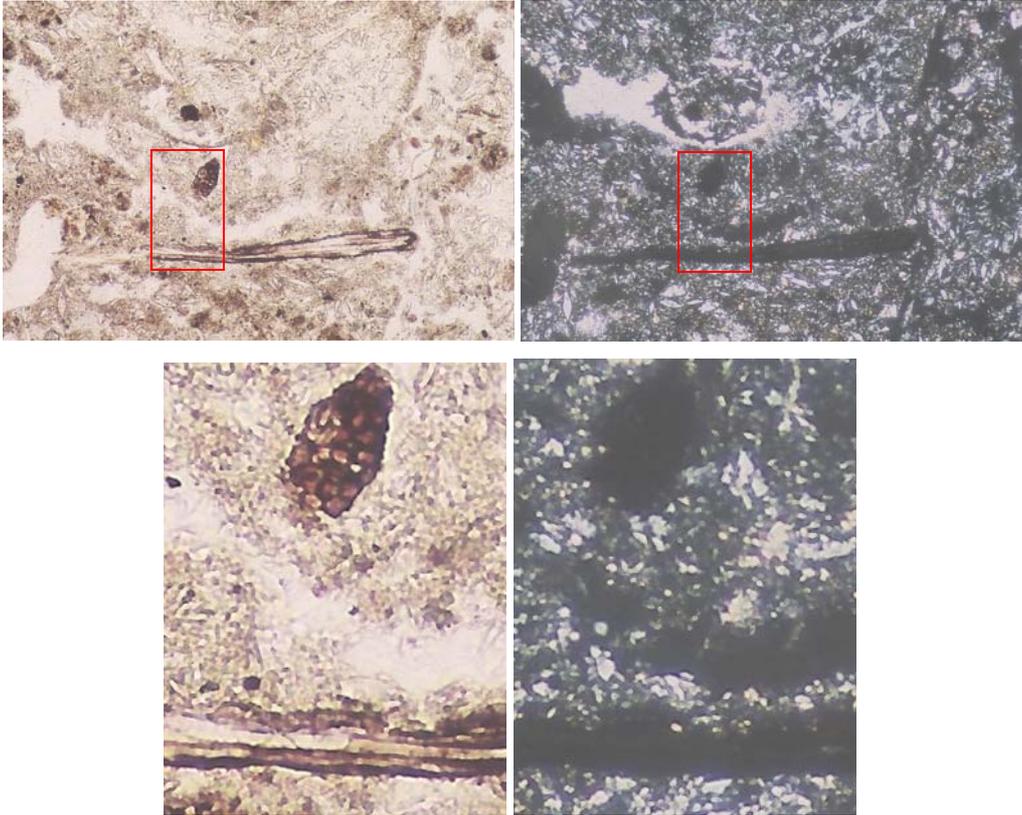


Figura IV.179, LPP. Organización en islas y rellenos de yeso microcristalino alargados descritos en campo como yeso vermiforme. La mitad inferior derecha corresponde a horizonte hipergípsico con fábrica-b microgípsica. (35-45 cm), LPP. Lado mayor 6.8 mm.



Figuras IV.180, LPP y IV.181, LPC. Clastos sedimentarios traslocados, laminados, con fisuras horizontales o paralelas al borde superior con componentes más finos. Corresponden a fragmentos de costra superficial en áreas de riego (Stoops, 2003). Lado mayor 6.8 mm.



Figuras IV.182, LPP y IV.183, LPC. Raíz y esporas en grupo botroidal. Fábrica-b microgíptica. Lado mayor de las dos primeras Figuras 1.1 mm.

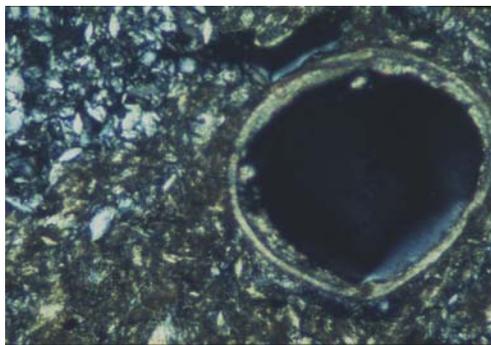
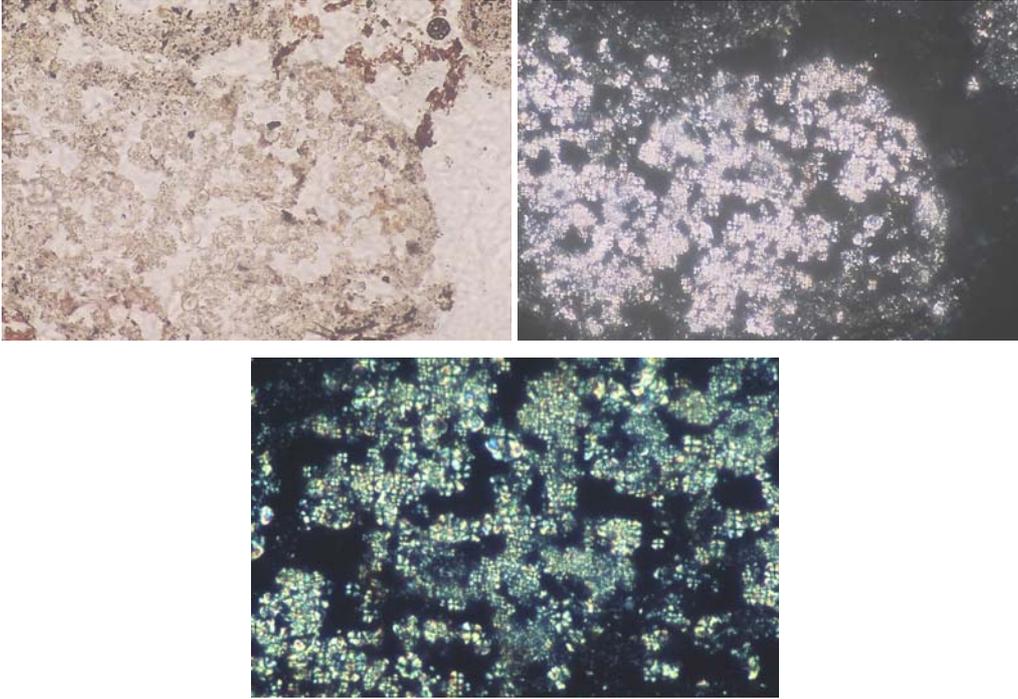
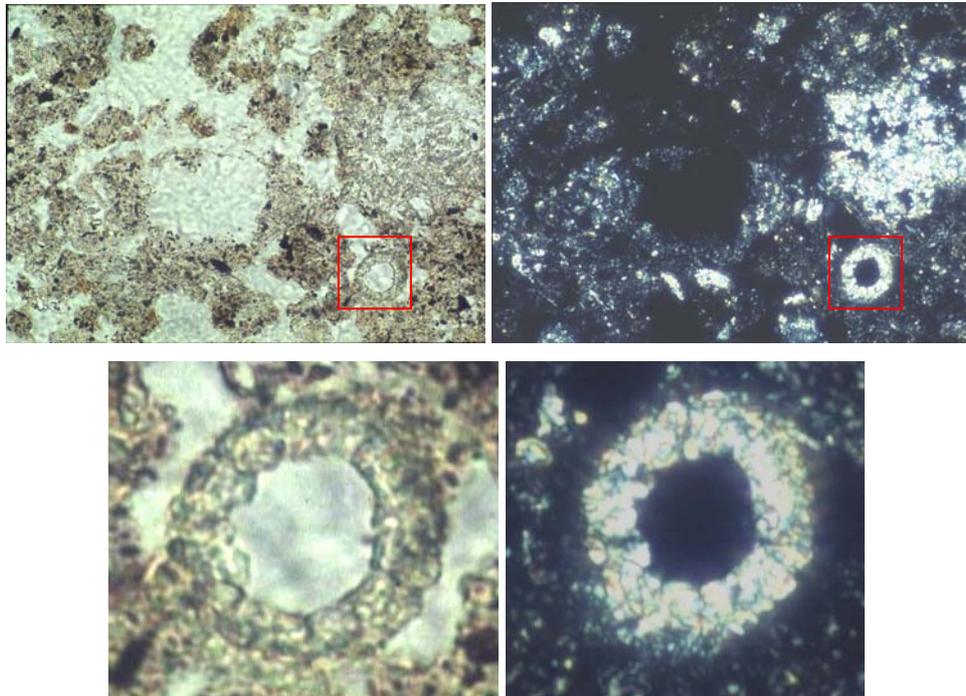


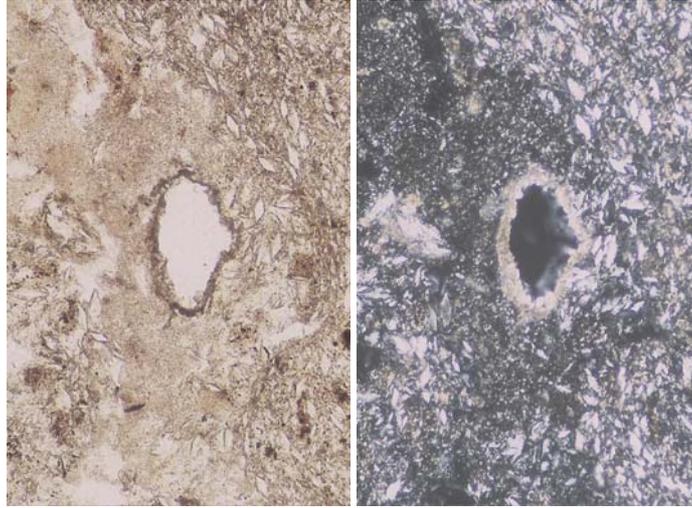
Figura IV.184, LPC. Posible valva de anélido (100-110 cm). Lado mayor 0.35 mm.



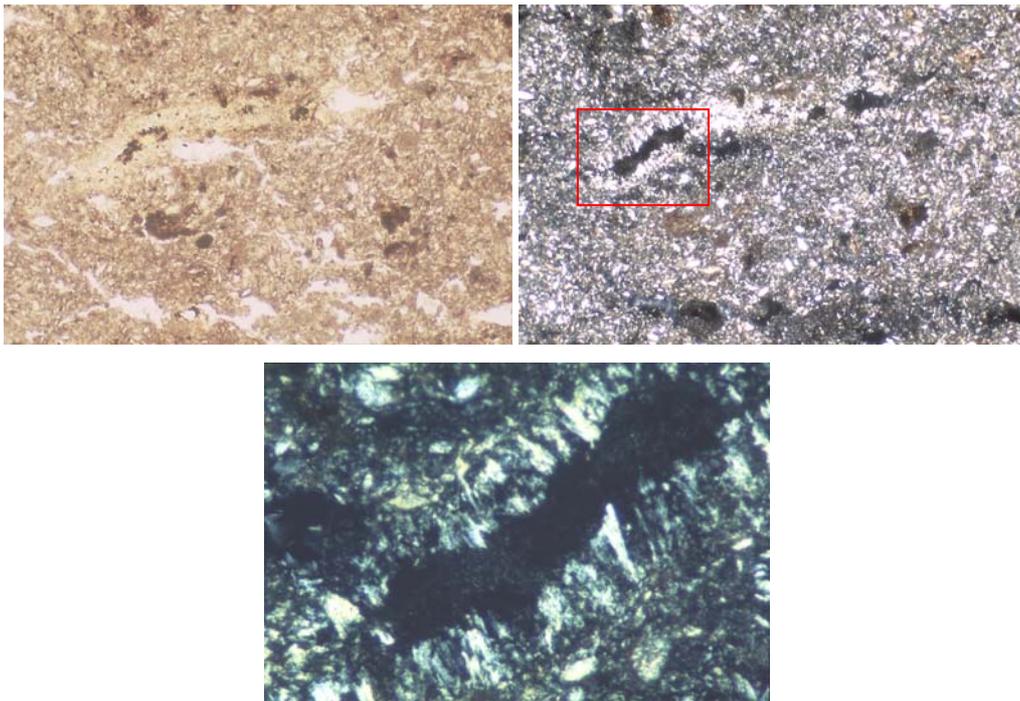
Figuras IV.185, LPP y IV.186, LPC. Relleno con esferulitas, carbonato de calcio, con interferencia psuedouniaxial (Stoops, 2003). H:35-45 cm. Lado mayor 0.35 mm.



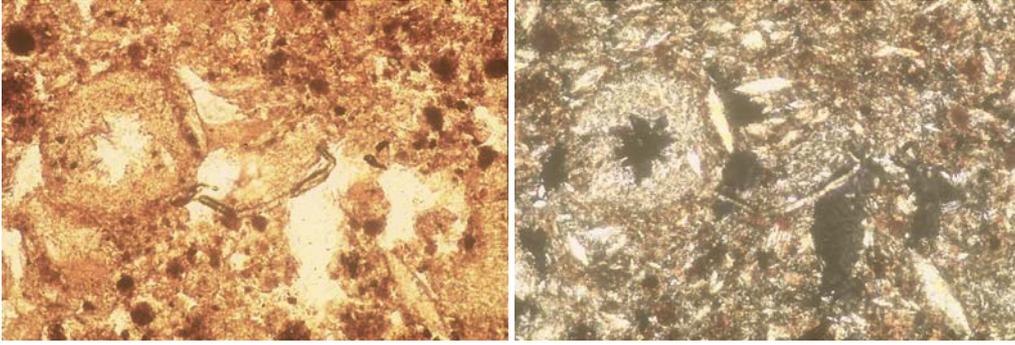
Figuras IV.187, LPP y IV.188, LPC. Calcita citomorfa, o raíz calcificada, de microesparita (acercamiento) de reciente cristalización por su aspecto transparente, similar a la calcita cristalizada en las células corticales del parénquima (Jaillard *et al.*, 1991). Lado mayor 0.55 mm.



Figuras IV.189, LPP y IV.190, LPC. Revestimiento de microesparita sobre yeso microcristalino. Cristales de yeso lenticular orientados paralelamente al poro. Lado menor 0.7 mm.



Figuras IV.191, LPP y IV.192, LPC. Acercamiento de la sección longitudinal de un “tubo” de yeso xenotópico a manera de revestimiento. Lado mayor 1.1 mm.



Figuras IV.193, LPP y IV.194, LPC. Nódulo disórtico geódico con revestimientos de microesparítica, constituido de yeso lenticular idiomórfico. Organización en islas y fábrica-b microgíptica con microesparita. Lado mayor 1.1 mm.

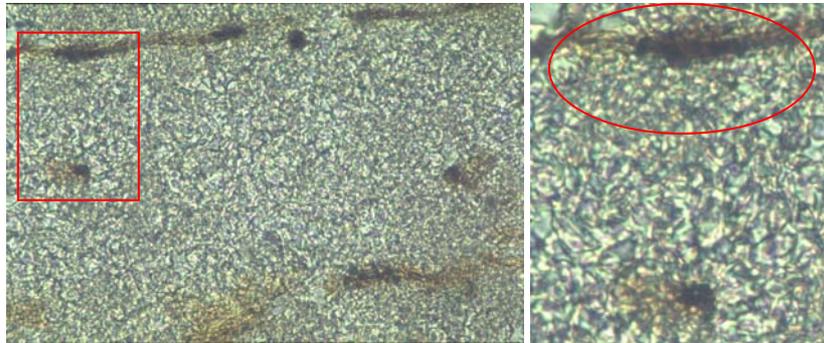


Figura IV.195, LPC. Nódulo de yeso microcristalino con cristales ligeramente más finos en los sitios donde se encuentran las estructuras orgánicas de raíz o posibles de hifas. Lado mayor 0.35 mm.

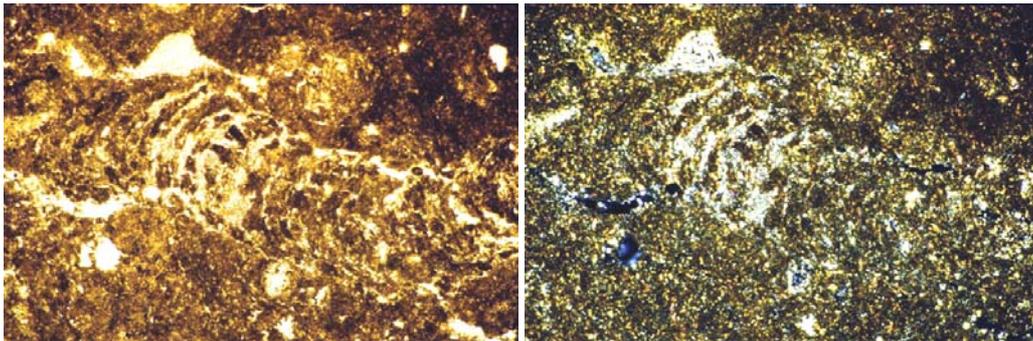


Figura IV.196, LPP y IV.197, LPC. Edaforrasgo de fábrica o pasaje de fauna, relleno de excrementos de lombriz. Lado mayor 6.8 mm.

**Perfil P6.**

**P6.A. Clasificación y características del sitio.**

Soil Survey Staff, 1999: Haplogypsis léptico, limoso grueso, gypsic, térmico.

WRB, 1999: Gipsisol episálico, hiposódico, hipergípsico.

Uso: Agostadero o apacentamiento de ganado mayor, sobreexplotado.

Relieve: Plano con ondulaciones centimétricas, pendiente menor al 2%. Altitud 1165 m.

Flora: Cedro (*Juniperus flaccida* Schl.) y pastos (*Bouteloua chasei* Sw, *Sporobolus airoides* L, y *Bouteloua hirsuta* Lag).

Erosión: Laminar.



Figuras IV.198 y 199. Sitio y perfil P6. Vegetación de cedro, *Juniperus flaccida* Schl. Calicata sobre yeso farinoso.

**P6.B. Descripción macromorfológica.**

A. Profundidad 0 – 3 cm. Seco. Color en seco 10YR 6/2 y en húmedo 10YR 5/2. Franco arcilloso. Consistencia en seco muy duro y en saturado plástico pegajoso. Estructura laminar con tendencia a bloques subangulares moderadamente desarrollados. Raíces de pasto, medias abundantes. Poros canales finos muy abundantes. Sin reacción al HCl al 10 % ni al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Buena permeabilidad y buen drenaje. Transición tenue o difusa y límite horizontal.

Ayz1. Profundidad 3 – 28 cm. Ligeramente húmedo. Color en seco 10YR 6/3 y en húmedo 10YR 5/3. Franco arenoso. Consistencia en seco ligeramente duro y en saturado ligeramente plástico y ligeramente pegajoso. Estructura laminar con tendencia a bloques subangulares de desarrollo medio. Raíces medias y finas

comunes. Poros canales finos. Reacción ligera al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Buena permeabilidad y con buen drenaje. Transición media y límite ligeramente ondulado.

Ayz2. Profundidad 28 – 57 cm. Ligeramente húmedo. Color en seco 10YR 7/3 y en húmedo 10YR 6/3. Franco arcilloso. Consistencia en seco ligeramente duro, en húmedo friable y en saturado plástico y pegajoso. Estructura laminar con tendencia a bloques subangulares débiles. Raíces medias pocas. Poros canales de raíces. Ligera reacción al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Buena permeabilidad y buen drenaje. Transición marcada y límite ligeramente ondulado.

Yz. Profundidad 57 – 200 cm. Ligeramente húmedo. Color en seco 10YR 7/3 y en húmedo 10YR 6/3. Arenoso. Consistencia en húmedo friable y en saturado no plástico y no adherente. Estructura laminar tendiendo a masiva. Raíces muertas y vivas muy pocas. Poros canales. Ligera reacción al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Buena permeabilidad y con buen drenaje.

Tabla IV.13. Resultados de los análisis físicos y químicos, Pedión P6.

Profundidad cm	Horizonte	Tamaño de partículas, %			pH H <sub>2</sub> O 1:2.5	MO %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/kg suelo	CEes dS/m 25 °C	Cationes solubles mmol/l extracto				RAS
		Ar	L	Ac					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
		0-3	A								8.7	1.95	
3-28	Ayz1				8.4	0.90	3.8	13.5	13.0	17.5	6.5	12.3	3.1
28-57	Ayz2				8.3	0.50	<1	17.2	14.0	32.3	8.5	17.0	3.5
57-200	Yz				8.3	0.80	3.7	10.4	14.9	19.8	4.0	22.0	5.3

Profundidad cm	Horizonte	CaCO <sub>3</sub> Total %	Yeso %	CIC cmol/kg suelo	Cationes intercambiables, cmol/kg suelo				PSI	Da g/cc
					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>		
					0-3	A	1.20	29.0		
3-28	Ayz1	1.00	18.5	18.0			0.83	1.1	6.1	1.08
28-57	Ayz2	0.95	15.4	22.0			0.81	1.5	6.8	1.25
57-200	Yz	0.90	56.6	20.0			0.38	1.0	5.0	1.30

**P6.C. Descripción micromorfológica.**

**P6.C.1. Microestructura.** En los primeros tres centímetros (correspondientes al horizonte superficial) la microestructura es de bloques subangulares muy débiles, posteriormente (segundo horizonte) corresponde a estructura laminar débilmente desarrollada con vesículas. El tercer horizonte es apedral y corresponde a masiva con vesículas y canales. El cuarto horizonte tiene débil pedialidad y corresponde a laminar con vesículas. Las islas en el primer horizonte constituyen un 1 % de la lámina y son de 0.06 a 0.3 mm, en el segundo ocupan un 2 % y el tamaño varía de 0.090 a 0.5 mm y en el tercer horizonte constituyen cerca del 3 % de la lámina con tamaños de 0.1 a 1.0 mm.

**P6.C.2. Huecos.** En el primero y segundo horizonte la porosidad es del 20 %, consiste de vesículas (10 %, 0.09 a 0.425 mm); cámaras (4 %, 0.3 – 3.2 mm), canales (4 %, 0.1-2.0 mm); fisuras (4 %, de 30 a 225  $\mu$ m) con paredes onduladas y/o serradas cuando tienen revestimientos de yeso lenticular, con orientación horizontal. La microestructura es de bloques subangulares y masiva con vesículas y tendencia a laminar.

En el tercer horizonte la porosidad es del 25 %, predominan las vesículas con un 15 % (0.09-1.0 mm); le siguen en importancia los canales con un 7 % (0.04-2.1 mm); y por último cámaras con un 3 % (0.1-4.0 mm). Las paredes de los huecos son lisas a onduladas y la microestructura es masiva con vesículas.

En el cuarto horizonte la porosidad es del 20 %, predominando las fisuras con el 8 % (0.045 – 1.5 mm) y orientación horizontal; las vesículas representan un 6 % de los huecos (0.045-0.6 mm); las cavidades conforman el 4 % (0.06-0.3 mm); los canales de tamaño (1 %, 0.05-0.3 mm) y las cámaras (1 %, 0.3 – 1.4 mm); las paredes de los poros son serradas y algunas lisa-ondulada. La microestructura es masiva-laminar con vesículas (Figuras IV.200 y IV.201).

**P6.C.3. Componentes orgánicos.** En el primero y segundo horizonte son escasas las raíces (0.1-0.6 mm) de color pardo rojizo a amarillento en LPP y pardo muy oscuro en LPC, partes con birrefringencia, se aprecia la estructura celular. Un corte longitudinal de raíz, 0.4x5 mm, color pardo amarillento en LPP y amarillento en LPC, birrefringente y con algunos granos de whewelita de 50  $\mu$ m. Hay raras valvas posiblemente de anélidos (MacKenzie y Adams, 1997) de color pardo rojizo en LPP y pardo en LPC,

birrefringente. Componentes orgánicos anhistos rojos en LPP y LPC birrefringentes. Son raros los restos carbonáticos correspondientes a ostrácodos.

En el tercer horizonte las raíces son frecuentes (0.12-1.2 mm) de color pardo rojizo a oscuro en LPP y pardo muy oscuro en LPC, birrefringencia, corteza flobafenizada. Son raros los radicohistos (0.1-0.4 mm) de color pardo muy oscuro en LPP sin birrefringencia. En el cuarto horizonte son raras las raíces de color pardo rojizo en LPP y pardo muy oscuro en LPC. Son raros los radicohistos con tamaños de 0.1 a 0.3 mm, flobafenizados y sin birrefringencia.

#### **P6.C.4. Masa basal**

**P6.C.4.1. Material grueso.** En el primero y segundo horizonte la relación grueso/fino es de 3/1. El principal mineral es yeso lenticular (60 %) de diversos tamaños menores de 125  $\mu\text{m}$ , son abundantes los cristales de yeso grandes rodeados por pequeños (< 20  $\mu\text{m}$ ) en forma paralela. Son frecuentes los cristales de yeso con líneas de polvo y con aspecto ondulado por las acreciones o posibles disoluciones (Figuras IV.202 y IV.203); son frecuentes los cristales con macla en punta de flecha o cola de golondrina (8 %, 60 - 90  $\mu\text{m}$ ) muy delgados, también presentan fracturas e inclusiones de microesparita o micrita. También se encuentran cristales de yeso lenticular (3 %) de color blanco “lechoso” o “perlado” límpido, el tamaño es menor o igual a 60  $\mu\text{m}$ .

Otros minerales presentes son el cuarzo en cantidad menor al 2 %, mal clasificado, tamaño menor a 0.09 mm, sin alterar; el 2 % es calcita < 50  $\mu\text{m}$ ; son muy raros los cristales de olivino de alto relieve (Figuras IV.204 y IV.205) y aspecto transparente, no pleocroico en LPP, birrefringente, de color amarillento a rojizo en LPC con exfoliación irregular. En un tejido de raíz se tienen algunos cristales de whewelita menores a 50  $\mu\text{m}$ .

En el tercer horizonte la relación grueso/fino es de 7/3. El yeso lenticular idiomórfico constituye el 60 %, con tamaños más grandes que en el horizonte anterior, limo a arena media (225  $\mu\text{m}$ ), son comunes los minerales con líneas de polvo transversales, y con bordes ondulados; presentan fuerte orientación a huecos, agregados y granos grandes, algunos yesos están soldados. El yeso con macla en punta de flecha o cola de golondrina también es más grande a los del primer horizonte y en mayor porcentaje (10

%), variando de 55 a 425  $\mu\text{m}$  con líneas de polvo diagonales, posiblemente de micrita. Son frecuentes los minerales indentados en nódulos o rellenos.

En el cuarto horizonte la razón grueso/fino es 3/1. Hay yeso lenticular idiomórfico (25 %) con tamaño de hasta 300  $\mu\text{m}$ , pero predominan los de tamaño arena muy fina (45 %, 50-80  $\mu\text{m}$ ); la proporción de yeso indentado es mayor que en el horizonte anterior; el yeso con macla en punta de flecha o cola de golondrina disminuye (5 %) respecto al horizonte anterior, el tamaño es hasta de 300  $\mu\text{m}$ . En todo el perfil por la distribución de yeso menor a 20  $\mu\text{m}$  alrededor de granos más grandes da ligera apariencia de distribución relativa g/f quitónica, de lo contrario es porfírica cerrada a espacio simple.

**P6.C.4.2. Material fino.** En los primeros dos horizontes el material fino es ligeramente punteado, con color de interferencia gris-pardo y en LPP pardo amarillenta, constituida por yeso lenticular y calcita microesparita “flotando” sobre el yeso o revistiéndolo. En el tercer horizonte los colores son similares y con un poco más de puntos. En el cuarto horizonte también es punteada con tamaños similares a los del horizonte anterior. En todo el perfil la fábrica-b del material fino es microgíptica ligeramente punteada.

#### **P6.C.5. Edaforrasgos.**

**P6.C.5.1. Revestimientos.** En el primero y segundo horizonte son frecuentes los revestimientos típicos de microesparita birrefringente sobre cristales de yeso; son raros los revestimiento típicos de materia orgánica sobre minerales; son raros los revestimientos de yeso microcristalino y lenticular en raíces. En el tercer horizonte también predomina el revestimiento de microesparita en cristales de yeso. Son raros los revestimientos típicos de materia orgánica en minerales; son raros los revestimientos típicos paralelos de yeso lenticular en huecos y de yeso en raíces (Figuras IV.206 y IV.207). En el cuarto horizonte también hay revestimientos típicos de microesparita; es común el revestimiento radial o paralelo de yeso lenticular idiomórfico y xenomórfico, algunas veces indentado.

**P6.C.5.2. Rellenos.** En el primero y segundo horizonte hay raros densos incompletos de 90  $\mu\text{m}$  de tamaño, correspondiendo a yeso microcristalino; frecuentes sueltos discontinuos grisáceos, con tamaño de 0.1 a 0.225 mm, correspondiendo a masa basal,

algunos dispuestos transversalmente al bioporo y ligeramente arqueados, estos se corresponden a edaforrasgo de fábrica. En el tercer horizonte son frecuentes los sueltos discontinuos de masa basal en canales y cámaras; son frecuentes los densos completos o incompletos de yeso lenticular, blanco “lechoso” o “perlado”, de aspecto límpido. En el cuarto horizonte son frecuentes los sueltos discontinuos de masa basal, en fisuras; son raros los rellenos suelo discontinuo de yeso lenticular idiomórfico o xenomórfico.

**P6.C.5.3. Nódulos.** En el primero y segundo horizonte son raros los nódulos típicos órticos de microesparita (1.0 mm) de color pardo amarillento en LPP y pardo oscuro en nícoles cruzados, con cristales de calcita birrefringente y colores de segundo orden y sustituyendo al yeso lenticular (Figuras IV.208 a IV.211), considerados como calcita pseudomorfa. Son muy raros los nódulos típicos órticos de yeso microcristalino y tamaño 0.225 mm.

En el tercer horizonte hay raros nódulos (0.45 mm) órticos típicos de yeso microcristalino; también hay nódulos órticos típicos de micrita o microesparita (0.05-0.4 mm) con algunos revestimientos de materia orgánica muy flobafenizada y posible manganeso; raros los nódulos típicos órticos, de color pardo en LPP, birrefringentes y fábrica-b cristalítica gípsica.

En el cuarto horizonte son raros los nódulos típicos órticos (0.4-1.1 mm) de color pardo en LPP, de microesparita, con o sin cristales de yeso lenticular inmerso y con fábrica-b cristalítica punteada; otros muy raros y típicos (0.075-0.45 mm) redondeados, de color amarillento, órticos, por lo que se deduce su origen animal; son raros los nódulos órticos típicos (0.15 mm) de yeso lenticular idiomórfico a xenomórfico.

**P6.C.6. Excrementos.** En el primero y segundo horizonte son frecuentes los excrementos de 25  $\mu\text{m}$ , de color pardo amarillento, correspondiendo a oribátidos. En el tercer horizonte es frecuente el acomodo arqueado de la masa basal densa, coalescente, debida posiblemente a lombrices, corresponde a edaforrasgo de fábrica o pasaje de fauna. Son muy raros los excrementos ovalados de color pardo rojizo en LPP, correspondientes a oribátidos. En el cuarto horizonte son raros los elementos arqueados debidos a lombrices y que corresponden a edaforrasgo de fábrica.

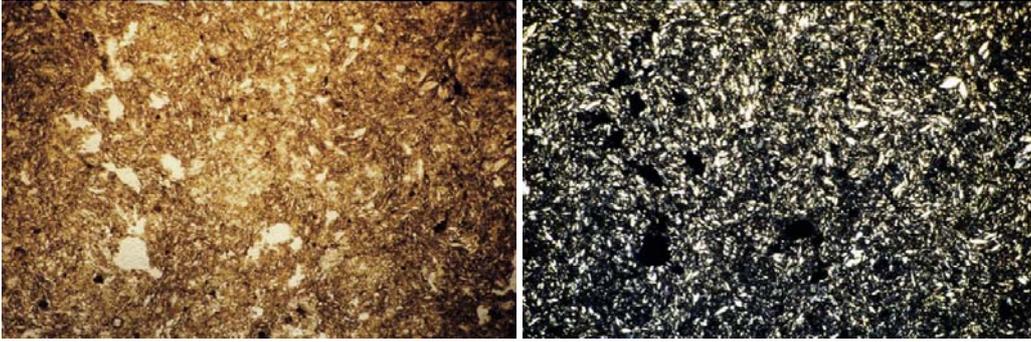


Figura IV.200, LPP y IV.201, LPC. Microestructura masiva vesicular. Lado mayor 6.8 mm.

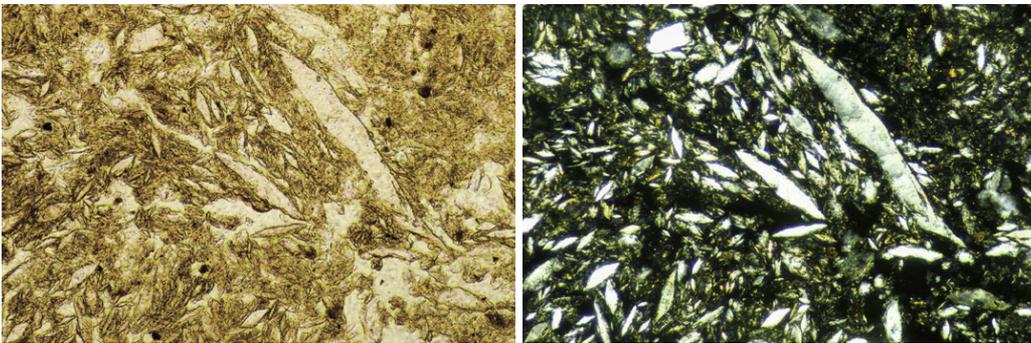


Figura IV.202, LPP y IV.203, LPC. Granos de yeso lenticular con disoluciones y revestimientos de microesparita. Lado mayor 3.4 mm.

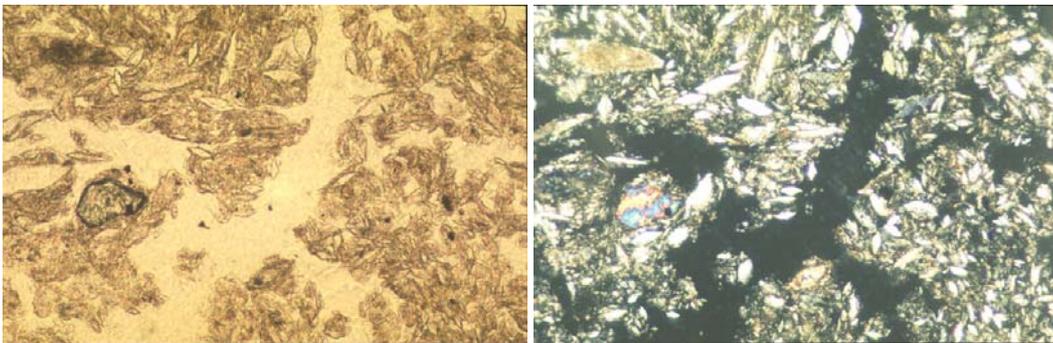


Figura IV.204, LPP y IV.205, LPC. Cristal posiblemente de olivino. Fábrica-b microgípsica. Lado mayor 3.4 mm.

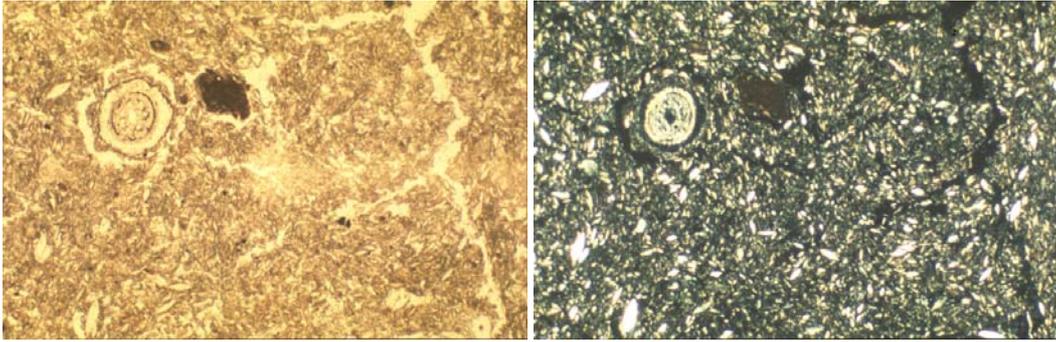


Figura IV.206, LPP y IV.207, LPC. Raíz revestida con yeso lenticular y microcristalino y junto a ella hay un nódulo micrítico. Lado mayor 3.4 mm.

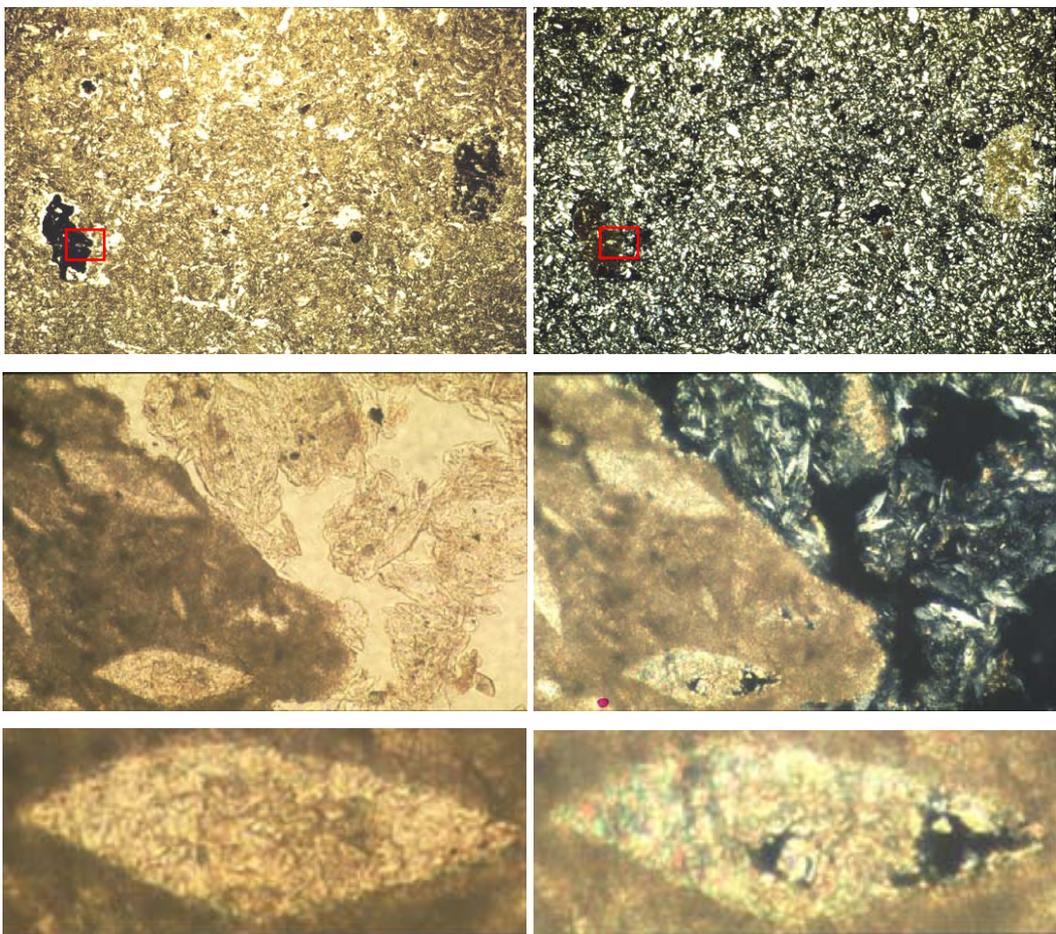


Figura IV.208, LPP a IV.211, LPC. Nódulo micrítico con pseudomorfos lenticulares conformados por calcita. Fábrica-b microgíptica. Lado mayor del primer par 6.8 y del segundo par 0.55 mm.

**Perfil P8.**

**P8A. Clasificación y características del sitio.**

Soil Survey Staff, 1999: Haplogypsis léptico, limoso grueso, gypsico, térmico.

WRB, 1999: Solonchak gípsico, hiposódico, arzico.

Uso: Apacentamiento de ganado mayor (Agostadero o cría de ganado en libertad).

Relieve: Plano con ondulaciones centimétricas, pendiente menor al 2%.

Flora: Romerillo (*Suaeda nigrecens* I. M. Johnston), mezquite (*Prosopis laevigata*), granadillo (*Maytenus phyllantoides* Benth.), huizache (*Acacia farnesiana* (L.) Willd).

Erosión: Laminar.



Figuras IV.212 y IV.213. Sitio y perfil P8. Suelo con costra salina y vegetación halófila de romerillo, *Suaeda nigrecens* en primer plano y al fondo granadillo, *Maytenus phyllantoides* y mezquite, *Prosopis laevigata*.

**P8.B. Descripción macromorfológica.**

Costra salina. 0-0.7 cm. Color en seco 10YR8/1. Cristales tabulares, transparentes de hasta 2.5 cm de largo, denominado comúnmente como selenita.

A. Profundidad 0.7 – 11 cm. Húmedo. Color en seco 10YR 8/2 y en húmedo 10YR 7/3. Franco arcilloso. Consistencia en húmedo friable y en saturado no plástico y ligeramente adherente o pegajoso. Estructura bloques subangulares débilmente desarrollados. Raíces finas frecuentes. Poros canales de raíz y finos comunes. Sin reacción al HCl al 10 % ni al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Permeabilidad mala y drenaje deficiente. Se encontraron numerosos cristales transparentes de tamaño menor o igual a 2.0 cm en forma de “tablillas” o tabular, correspondientes a cristales de yeso denominado selenita. Transición tenue y límite ligeramente ondulado.

Yz. Profundidad 11 – 42 cm. Muy húmedo. Color en húmedo 10YR 7.5/3. Franco arcilloso, se tuvo problemas para determinar la textura al tacto debido a la gran cantidad (> al 40 %) de cristales de yeso de 5 mm o mayores, sin orden y que pinchaban. Estructura masiva. Consistencia en húmedo friable y en saturado ligeramente pegajoso. No hay raíces. Poros de empaquetamiento simple por cristales de yeso. Sin reacción al HCl al 10 % ni al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Mala permeabilidad y drenaje deficiente.

Tabla IV.14. Resultados de los análisis físicos, químicos y mineralógicos, Pedión P8.

Profundidad cm	Horizonte	Tamaño de partículas, %			pH H <sub>2</sub> O 1:2.5	MO %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/kg suelo	CEes dS/m 25 °C	Cationes solubles mmol/l extracto				RAS
		Ar	L	Ac					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
0-0.7	Costra				8.8	0.70	9.5	58.8	5.05	368.1	71.2	535.9	39.2
0.7-11	A				8.6	0.08	12.0	20.0	10.9	300.6	12.5	87.4	7.0
11-42	Yz				8.5	2.20	3.7	13.0	10.0	239.0	6.9	48.5	4.3

Profundidad cm	Horizonte	CaCO <sub>3</sub> Total %	Yeso %	CIC cmol/kg suelo	Cationes intercambiables, cmol/kg suelo				PSI	Da g/cc
					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>		
0-0.7	Costra	1.5	21.0	14.4			9.15	36.4	25.2	1.02
0.7-11	A	1.3	36.5	19.9			0.98	2.06	10.4	1.30
11-42	Yz	1.2	33.0	15.0			1.05	1.50	10.0	1.40

**Mineralogía, orden decreciente de concentración relativa, DR-X**

0.7-11	A	Yeso, cuarzo‡, esmectita‡								
11-42	Yz	Yeso, montmorillonita‡, cuarzo‡								

‡ Mineral en muy baja proporción en relación al resto de los minerales.

**P8.C. Descripción micromorfológica.**

**P8.C.1. Microestructura.** La lámina delgada del primer horizonte presenta tres partes: 0-1.3 (a), de 1.3-4.0 (b) y de 4.0-8 cm (c), respectivamente (Figura IV.214). La primera corresponde a la costra (Figuras IV.215 y IV.216) ondulada, laminar, conformada por varias “bandas” (0.5-1.3 mm). La segunda tiene pedialidad muy débil, con estructura masiva y tendencia laminar, muy débil. Después el suelo es apedial con estructura masiva con algunas cámaras. El segundo horizontes es apedial y tiene estructura masiva con cámaras.

**P8.C.2. Huecos.** La costra tiene una gran porosidad (60 %). Los huecos corresponden a fisuras (40 %, 0.045 a 2 mm) horizontales y onduladas; los demás son poros de empaquetamiento compuesto (0.03 a 1.2 mm). En la segunda parte (1.3-4.0 cm) la porosidad es mucho menor (20 %) y corresponde principalmente a cavidades (15 %, 0.03-0.45 mm), fisuras (3 %, 0.04-0.225 mm) y cámaras (2 %); los huecos son de paredes lisa onduladas y/o serradas, la microestructura es masiva con cavidades.

La tercera parte (4-8 cm) tiene porosidad similar a la segunda (20 %) con predominancia de cavidades (15 %, 0.06-0.7 mm); cámaras (2 %, 0.6 mm); las fisuras (1 %, 1.0 mm); los canales (1 %, 0.8 mm); todos los huecos tienen paredes rugosas a serradas; la microestructura es masiva con cavidades.

En el segundo horizonte (15-25 cm) la porosidad es del 25 %. Predominan las cámaras (15 %, 0.18-1.3 mm) con paredes rugosas a serradas; las cavidades (6 %, 0.045-0.7 mm) de paredes rugosas a serradas; y las fisuras (4 %, 0.07-0.4 mm) de paredes rugosas a serradas debido al yeso; la microestructura es masiva con cámaras.

**P8.C.3. Componentes orgánicos.** En la costra solamente hay una raíz de color pardo en LPP y amarillo a pardo amarillento en LPC, birrefringente, tamaño de 0.2 mm. Debajo de la costra (segunda parte) son frecuentes las raíces (1 %, 0.1 - 1.25 mm) con o sin flobafeno, de color pardo a pardo muy oscuro en LPC y pardo amarillento en LPP, birrefringentes, en las que se aprecia la estructura celular; son raros los radicohistos (150 µm) de color amarillo rojizo en LPP; son raros los bioclastos (anhistos) alargados (0.04x0.11 mm) de color amarillo en LPP y LPC, birrefringentes.

En la tercer parte de la primera lámina, son muy raras las raíces flobafenizadas, de color pardo rojizo en LPP y pardo muy oscuro en LPC, no se aprecia la estructura celular, de 0.7 mm. En el segundo horizonte sobre granos de yeso e islas limo arcillosas se detectó material fino de color rojo en LPP y en LPC, birrefringente que en partes se pudiera confundir con manto fúngico, pero que sin embargo se considera artefacto por el color rojo intenso (Figuras IV.217 y IV.218).

#### **P8.C.4. Masa basal**

**P8.C.4.1. Material grueso.** En la costra la relación grueso/fino es de 3/2. Constituida por yeso lenticular (30 %, 0.02-0.45 mm) muy alterado. Son abundantes los trozos de yeso con macla en punta de flecha o cola de golondrina (20 %, 0.1-1.5 mm), birrefringentes. Muy raros minerales de halita (Figura IV.219 y IV.220). Son muy raros los minerales de olivino. La distribución relativa g/f es porfírica abierta.

En la segunda parte (0.7 a 4 cm) la relación grueso/fino es de 6.5/3.5. Predomina el yeso lenticular (45 %, 0.02-0.45 mm), parcialmente orientado horizontalmente al límite con la costra; los más pequeños se orientan paralelamente a los más grandes o a nódulos de yeso lenticular, microesparíticos o esparíticos, presenta líneas de polvo transversales. Son abundantes (19 %) los trozos de yeso con macla en punta de flecha o cola de golondrina, con tamaño de 0.05 a 0.6 mm; los más grandes 0.12x2.3 mm, presentan líneas de polvo longitudinales y transversales. En forma aislada (< 1 %) hay cristales de olivino con alto relieve y color de segundo orden. Son raros los granos de calcita (1 %) de tamaño 150 µm En un nódulo se presenta calcita pseudomorfa lenticular. La distribución relativa g/f es porfírica cerrada.

En la tercera parte (4-8 cm) de la primera lámina la relación grueso/fino es de 3/1. Predomina el yeso con macla en punta de flecha (25 %, 0.2-2.3 mm), muy fragmentados, con orientación vertical y a los poros, con líneas de polvo longitudinales y transversales. El 18 % es yeso tabular de 0.1 a 0.25 mm de grueso y de 2 a 3 mm de largo (Figura IV.221 y IV.222), algunos de los cristales tienen los extremos con terminación en filo (plano aguda) y no en punta, con los costados ligeramente curvados semejando un yeso lenticular maclado con forma pseudotabular. La distribución relativa g/f es porfírica cerrada.

El yeso lenticular (20 %, 20 – 300 µm), está fuertemente orientado a poros y a minerales más grandes, presenta líneas de polvo diagonales; El yeso (10 %, 300-800 µm) con macla y terminaciones en punta, con líneas de polvo transversales (Figuras IV.223 a IV.226), este hábito es más abundante a mayor profundidad. El 2 % es celestina de tamaño < 10 µm de ancho por unas 50 µm de largo, transparentes en luz polarizada plana y birrefringentes en nícoles cruzados.

En el segundo horizonte la relación grueso/fino es 4/1. Predomina (40 %) el yeso lenticular con o sin macla y terminación en punta, de tamaño limo a grava fina (0.02-0.225 mm), los más grandes (1-3 mm) están más alterados, todos con líneas de polvo horizontales. Los cristales de yeso en punta de flecha o cola de golondrina (37 %) son más grandes que en el horizonte anterior (0.3-3.0 mm) y los completos son más comunes (0.3x6.0 mm), presentan líneas de polvo longitudinales y algunas horizontales, muchos fracturados (Figuras IV.227 a IV.230). Es común (3 %) la celestita en poros, el tamaño es < 10 µm de ancho por unas 50 µm de largo, transparentes en luz polarizada plana y birrefringentes en nícoles cruzados (Figura IV.231 a IV.234). La distribución relativa g/f es porfírica cerrada.

**P8.C.4.2. Material fino.** En la costra es de color pardo muy oscuro en LPP y pardo oscuro en LPC, dispuesto en bandas (revestimientos) en pequeños agregados, su composición es micrítica, microesparítica y gípsica, la fábrica-b es microesparítica. Debajo de la costra, es de color pardo amarillento en LPP y gris en LPC, compuesto de yeso lenticular y material arcillo-carbonático, la fábrica-b es cristalítica microesparítica y microgípsica punteada. En el resto de la primera lámina la micromasa es de color pardo en LPP punteado, con fábrica-b cristalítica micrítica y microgípsica.

En el segundo horizonte el material fino se presenta principalmente en cámaras como agregados limo-arcillosos, birrefringentes, de color amarillo en LPP y grisáceo amarillento en LPC, fábrica-b indiferenciada y grano estriada punteada. En algunas fisuras sin cristales de yeso la micromasa es de color pardo en LPP y gris en LPC, constituida de micrita, con fábrica-b calcítica micrítica.

#### **P8.C.5. Edaforrasgo.**

**P8.C.5.1. Revestimientos.** En la costra son abundantes los revestimientos en casquetes enlazados uniendo a granos de yeso como a material fino, ondulado, de color pardo en LPP, de tamaño 35 a 110 µm, microesparíticos, birrefringente, fábrica-b micrita (Figura IV.215, IV.216, IV.235 y IV.236). Son muy raros los revestimientos típicos de materia orgánica sobre agregados y minerales. Debajo de la costra también presenta revestimiento en casquetes enlazados microesparíticos; son raros los típicos de materia orgánica sobre minerales y agregados, de color pardo amarillento a pardo, sin birrefringencia y sin orientación, con fábrica interna indiferenciada.

En la tercera parte (c, Figura IV.214) de la primera lámina se tienen frecuentes revestimientos típicos de color pardo, sin birrefringencia, de constitución limo arcillosa, sobre nódulos, cristales y en huecos. Son frecuentes los revestimientos típicos de color pardo en LPP, birrefringentes, con fábrica-b cristalítica microesparítica, sobre los cristales y líneas de polvo de los cristales de yeso. Son raros los revestimientos típicos de yeso lenticular en huecos, de color amarillo tenue.

En el segundo horizonte son frecuentes los revestimientos típicos limo arcillosos amarillentos en LPP y amarillo rojizo en LPC, birrefringentes sobre los cristales de yeso, principalmente dentro bioporos. Son frecuentes los revestimientos típicos de color rojo en LPP y LPC, sobre agregados y cristales de yeso, que se pudieran confundir con origen fúngico (Figura IV.217 y IV.218), sin embargo se trata de artefactos, quizás corresponden a impregnación de pintura durante el proceso de obtención de la sección delgada.

**P8.C.5.2. Rellenos.** En la costra y debajo de ella no se apreciaron rellenos. En la tercera parte de la primera lámina (4-8 cm) son raros los rellenos sueltos discontinuos de agregados de material fino de color pardo oscuro limo carbonático. Son raros los sueltos discontinuos o densos incompletos de yeso lenticular equigranular (75  $\mu\text{m}$ ), de aspecto lechoso o perlado. Son frecuentes los rellenos densos completos o incompletos de celestina y arcillosos, los últimos fracturados. En el segundo horizonte son frecuentes los rellenos densos completos o incompletos de celestina, birrefringentes, distribuida al azar. Son frecuentes los rellenos sueltos discontinuos de agregados de material fino arcilloso fracturados, límpidos y punteados con fábrica-b indiferenciada y grano estriada, y moteada. Son frecuentes los rellenos sueltos continuos de yeso lenticular de tamaño 30 a 80  $\mu\text{m}$ .

**P8.C.5.3. Nódulos.** En la costra no se encontraron nódulos. Debajo de la costra hay nódulos típicos disórtico de 0.6 a 1.8 mm de diámetro, denso, parduzco en LPP y gris en LPC birrefringente, con fábrica-b cristalítica esparítica (0.05-0.18 mm). Nódulo anórtico típico, lutítico, de 0.4 mm de diámetro, color pardo en LPP, desunido, fábrica-b interna indiferenciada. Anórtico típico de 5.0 mm, color grisáceo, fábrica-b interna cristalítica microesparita, en los huecos lenticulares se tiene esparita (30-50  $\mu\text{m}$ ) densa

completa o incompleta, constituido de calcita pseudomorfa (Figuras IV.237 a IV.239); Nódulo disórtico típico de 3 mm de diámetro, de calcita microesparítica, con cavidades, fábrica-b interna microesparítica. Un nódulo órtico típico, de color amarillento en LPP, 8.0 mm de tamaño, micromasa gípsica microcristalina y material grueso yeso lenticular.

En la parte c de la primera lámina (4 a 8 cm) hay nódulos típicos disórticos, limo-arcilloso-carbonáticos, de color pardo en LPC y en LPP, de 600 a 1000  $\mu\text{m}$  de diámetro. En el segundo horizonte no se detectaron nódulos.

**P8.C.6. Excrementos.** No se detectó actividad de mesofauna.

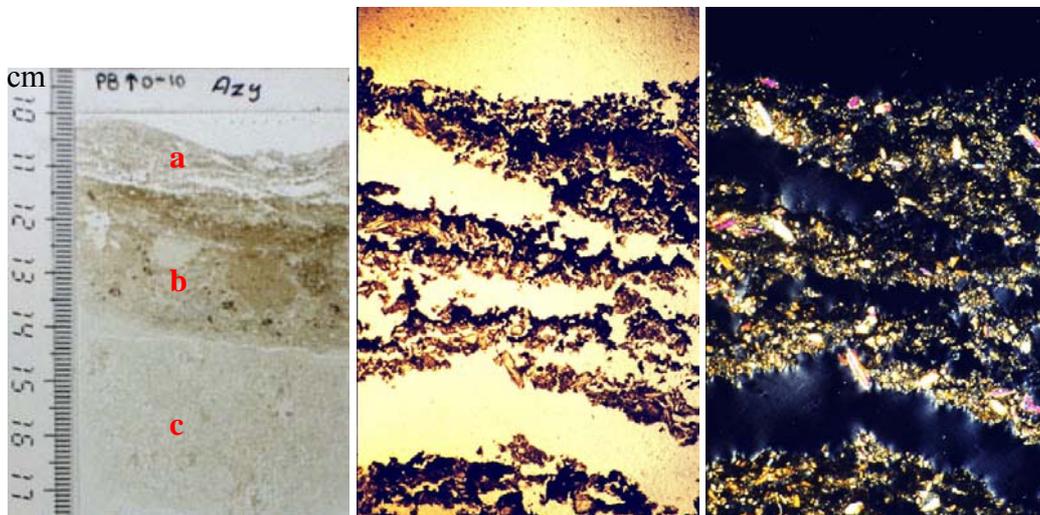


Figura IV.214, IV.215, LPP y IV.216, LPC. Lámina delgada mostrando costra superficial con estructura laminar ondulada (a), área transicional o segunda sección con mezcla de yeso y nódulos carbonáticos (b) y componentes orgánicos y el horizonte yesoso o tercera sección (c). Lado mayor 6.8 mm.

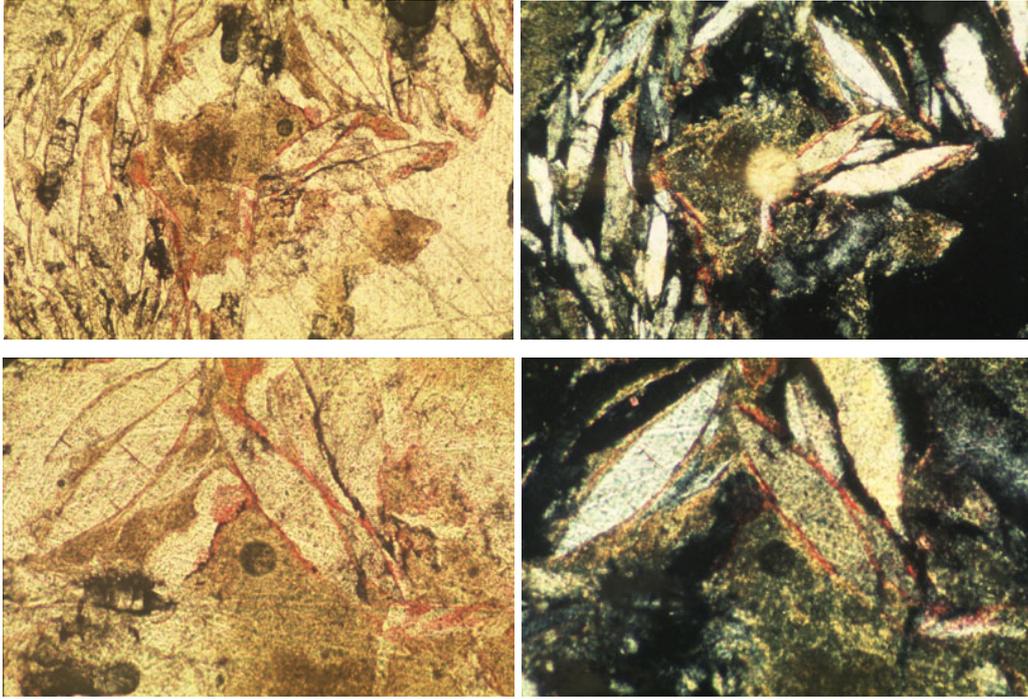


Figura IV.217, LPP y IV.218, LPC. Artefacto en un extremo de la lámina delgada de color rojo intenso tanto en LPP como en LPC, y que se pudiera confundir con manto fúngico en granos de yeso y sobre masa basal, esta última con fábrica-b grano estriada. Lado mayor del primer par 3.4 mm y del segundo 0.55 mm.

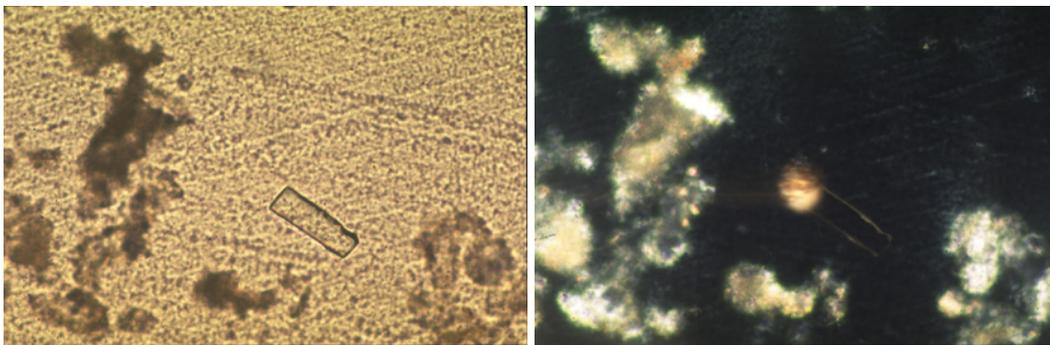
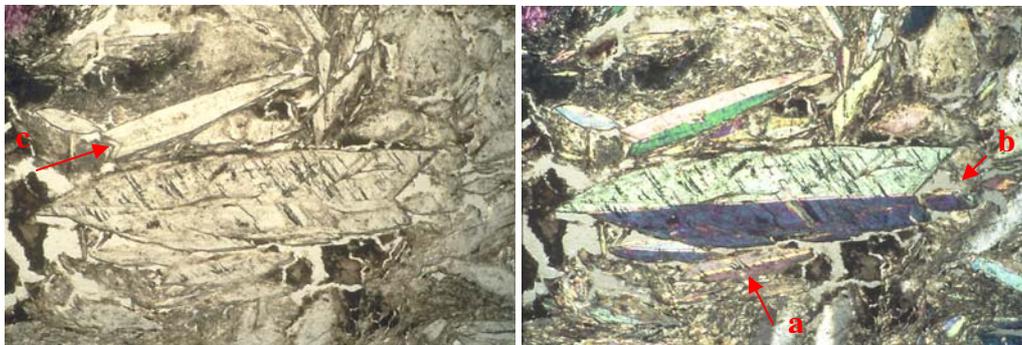


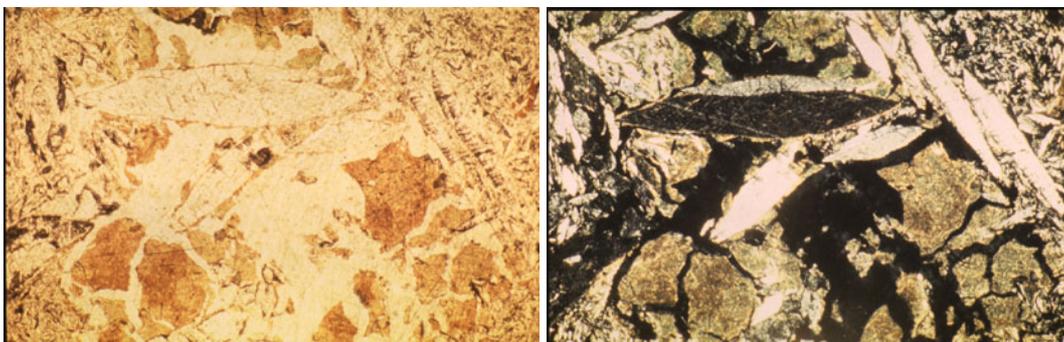
Figura IV.219, LPP y IV.220, LPC. Cristal aislado de halita, encontrado en la costra, con revestimientos de microesparita que hace posible su visualización. Lado mayor 0.55 mm.



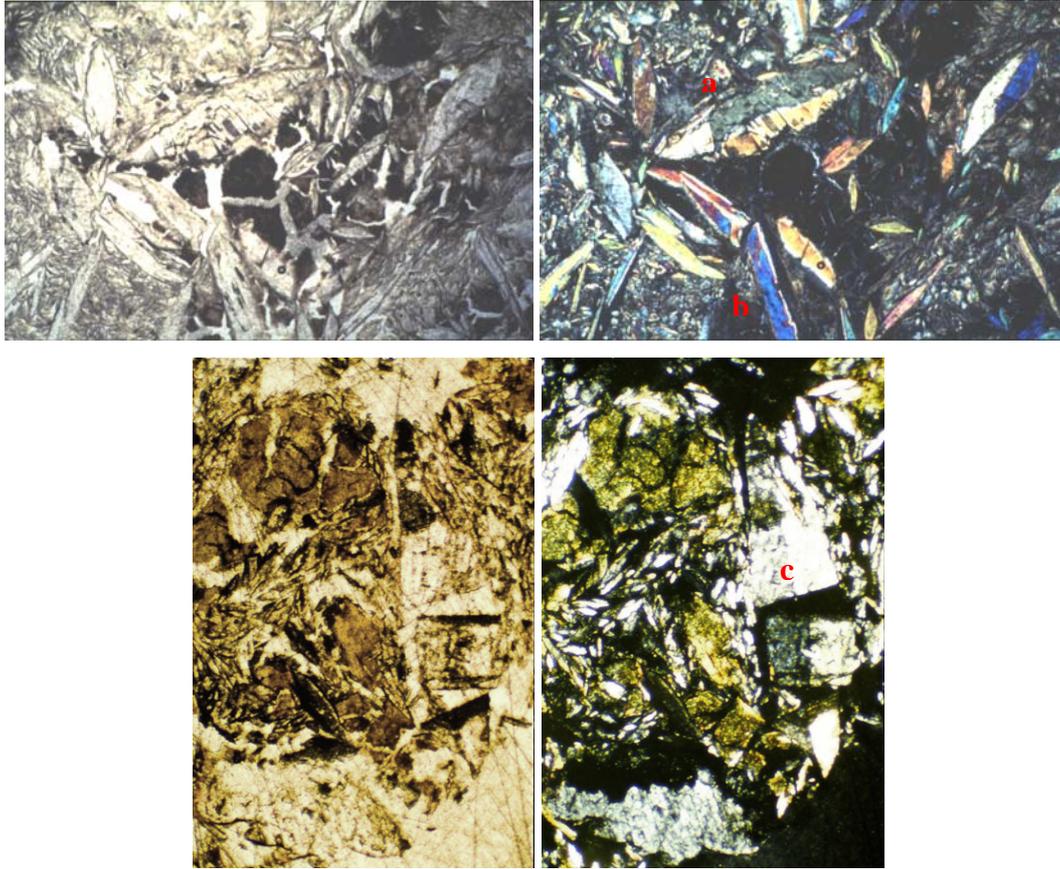
Figuras IV.221, LPP y IV.222, LPC. Yeso lenticular, tabular y con macla en punta de flecha, terminaciones en filo y en punta. Lado mayor 6.8 mm.



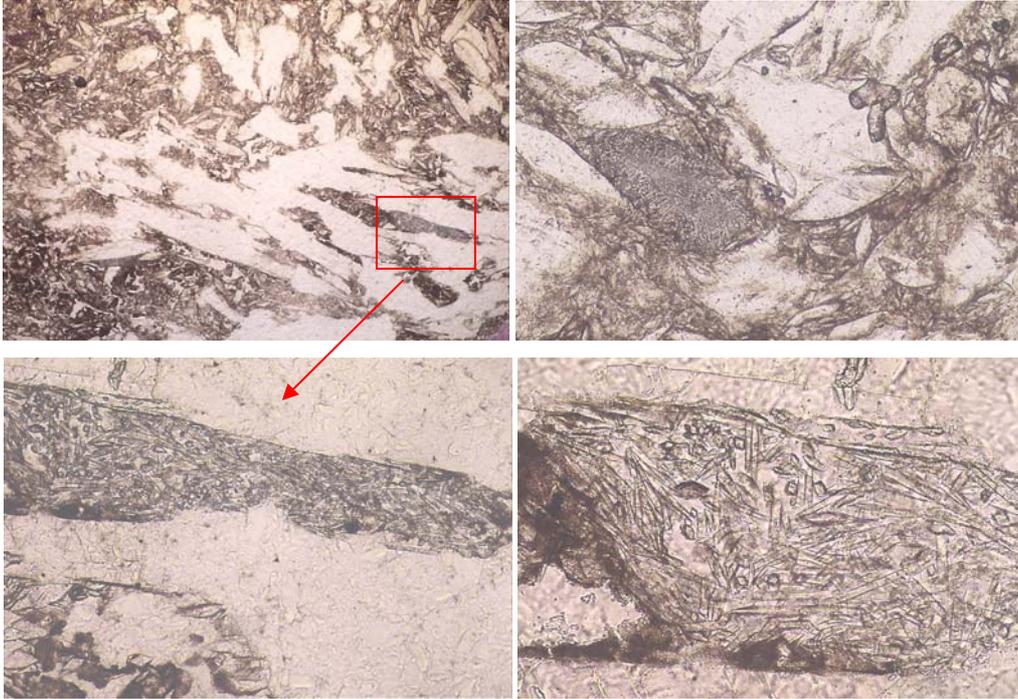
Figuras IV.223, LPP y IV.224, LPC. Yeso lenticular con macla y terminación en punta (a), y yeso con macla en punta de flecha con fragmentaciones (b), y otro con trozos de “cola de golondrina” desprendidos y líneas de polvo en ángulo o “v” (c) en la parte de la cola y posiblemente indica una fase de formación. Lado mayor 6.8 mm.



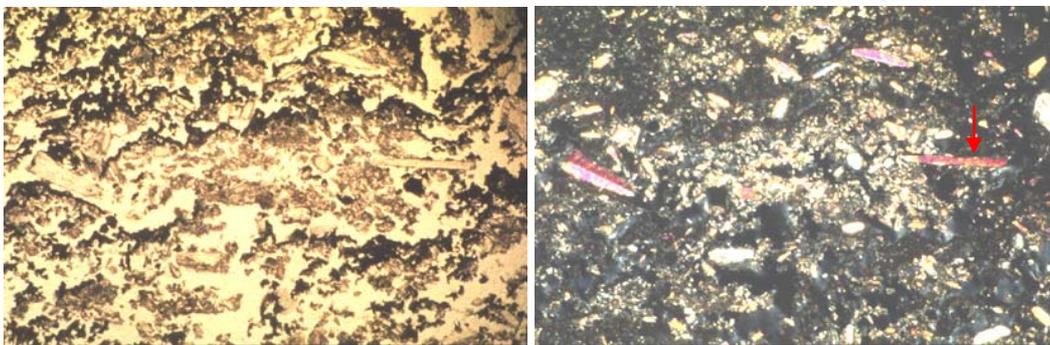
Figuras IV.225, LPP y IV.226, LPC. Yeso lenticular con macla y extremos terminados en punta, en él se aprecian líneas de polvo transversales. Hueco con agregados arcillosos posiblemente fragmentados por desecación, límpidos y acomodados, correspondiendo a material hospedante. Lado mayor 6.8 mm.



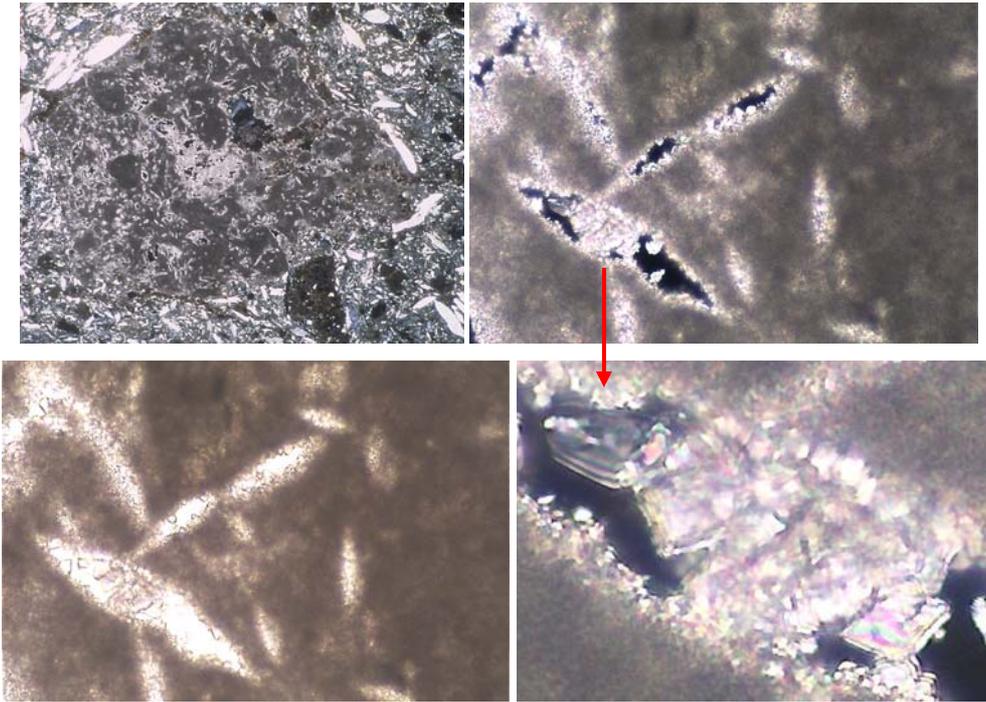
Figuras IV.227, LPP a IV.230, LPC. Yeso lenticular (a) con terminaciones en punta en fase avanzada de fragmentación. En la parte central inferior del primer par de Figuras hay un grano de yeso (b) con hábito prismático formado por la posible fragmentación del yeso en punta de flecha. Yeso en punta de flecha (c) fragmentado y rodeado de yeso lenticular. Las inclusiones por las que se fracturó posiblemente son de micrita. Lado mayor 6.8 y 3.5 mm.



Figuras IV.231 a IV.234, LPP. Nidos de celestina ( $\text{SrSO}_4$ ) con distribución al azar o con ligera orientación a lo largo del hueco, y con arreglo radial a las paredes del poro (última Figura). Lado mayor de la primera Figura 6.8 mm, de la segunda y tercera 1.1 mm y de la cuarta 0.55 mm.



Figuras IV.235, LPP y IV.236, LPC. Costra con revestimientos limo carbonático y en casquetes enlazados. Yeso tabular. Lado mayor 6.8 mm.



Figuras IV.237, LPP a IV.239, LPC. Nódulo micrítico-microesparítico con huecos lenticulares debido a la disolución del yeso, dichos huecos están siendo ocupados por calcita formándose los pseudomorfos de yeso lenticular compuestos de calcita. El nódulo está rodeado de yeso lenticular. Lado mayor de la primera Figura 6.8 mm y de las otras dos 0.55 mm, la cuarta es acercamiento de la segunda en la que se aprecian con más detalle los cristales de calcita posiblemente de reciente cristalización.

**D. Interpretación.** En estos perfiles se analizarán varios aspectos, tales como la presencia de ceniza en el perfil P1, la costra salina, sepiolita, hábitos del yeso, calcita pseudomorfa lenticular, entre otros.

**Ceniza volcánica.** En el segundo horizonte el contenido de materia orgánica es mayor (5.2 %) a la del horizonte superior (3.6 %) y un poco mayor al horizonte inferior (3.2 %). La salinidad y sodicidad se incrementan respecto al horizonte superior aunque el tercer horizonte es el más salino y más sódico (9.82 dS/m, RAS = 5.6, PSI = 6.5), y el porcentaje de materia orgánica es alto y sin embargo no tiene el color oscuro como en el segundo horizonte. También es posible que el horizonte haya sido sepultado al nivelar las tierras, operación efectuada cuando se estableció el cultivo de alfalfa, según los dueños de la tierra.

Las tierras de secano (temporal) contiguas a P1 sin nivelar y que no han sido irrigadas (según el dueño) tienen microdepressiones con horizonte superficial de color del suelo más oscuro que el primero de P1, pero es menos oscuro que el segundo horizonte de P1. Las áreas de secano están menos perturbadas que las de riego. Es decir, la acción antrópica puede ser la causa de encontrar un horizonte enterrado. El P1 no presenta características flúvicas, tales como decrecimiento irregular del carbón orgánico o estratificación como en P15 (descrito en el apartado 5.2.3).

Por otro lado el segundo horizonte del perfil P1 es posible que se trate de un horizonte con ceniza volcánica ya que presenta tixotropía, indicativo de la presencia de materiales amorfos. Al microscopio no se identificó vidrio volcánico posiblemente por ser un mineral isótropo, pero sí se encontró carbón. Soria (2004) al microscopio petrográfico encontró vidrio volcánico en perfiles de suelos yesosos del Tejocote y La Borreguita, Villa Juárez. Además aproximadamente a 25 km existen restos de actividad volcánica que pudieron dar origen a las cenizas, las posiblemente fueron transportadas por el viento y atrapadas en las microdepressiones.

El suelo de este horizonte es muy similar al cuarto horizonte de P15 y para detectar la presencia de materiales amorfos a ambas muestras de suelo se les determinó el pH en Fluoruro de sodio 1 M en relación suelo/NaF 1:2.5 y 1:50, y el desarrollo de color con fenolftaleína conforme a Fieldes y Perrott (1966). Para estos autores, un pH en NaF de más de 9.5 indica presencia abundante de productos alofánicos y/o complejos aluminio-

orgánico, y la WRB (1999) lo considera indicativo para la mayoría de los horizontes ándicos. En el horizonte de P1 el pH fue de 10.29 y 10.57, en el horizonte de P15 fue de 10.96 y 11.13 en relación 1:2.5 y 1:50, respectivamente. Los valores de pH cumplen para la presencia de materiales amorfos alofánicos o Al-Orgánico, y el pH más alto en el P-15 a su vez explicaría el porqué este horizonte es más tixotrópico.

La prueba de desarrollo de color con NaF e indicador fenolftaleína, indicadora de compuestos alofánicos, resultó positiva en ambos perfiles, con desarrollo de color rojo más intenso en P15. Fieldes y Perrott (1966) indican que los carbonatos interfieren en esta prueba ya que pueden originar un  $\text{pH} > 9.5$  y dar positivo, y agregan que es suficiente una reacción violenta al HCl al 10 %, condición presente en los dos horizontes. La cantidad de  $\text{CaCO}_3$  es mayor en P15 (18.8 %) que en P1 (6 %). El  $\text{pH}_{1:2.5}$  en agua fue de 7.8 y 7.6 para el P15 y P1, respectivamente.

Otra característica de la ceniza volcánica y que es útil para su identificación es su baja densidad aparente que a capacidad de campo debe ser menor a  $0.9 \text{ g/cm}^3$  (WRB, 1999). En el horizonte del perfil P1 (en el P15 no se determinó) es de  $1.02 \text{ g/cm}^3$  en suelo secado al aire y a capacidad de campo de  $1.3 \text{ g/cm}^3$ , son valores cercanos al requerido pero no cumplen con este requisito. La densidad aparente se pudo incrementar por la presencia de minerales no amorfos, como el yeso (28 %),  $\text{CaCO}_3$  (6.2 %), o las arcillas, entre otros.

El segundo horizonte de P1 y cuarto de P15 tienen en común la variación similar en algunas características. Por ejemplo, en la capacidad de intercambio catiónico, la materia orgánica, el  $\text{P}_2\text{O}_5$  en ácido cítrico y en carbonato de calcio tienen valores más altos que los demás horizontes de cada perfil. Los contenidos de MO y de carbonato de calcio equivalente son más altos en cuarto horizonte de P15 que en el segundo de P1 (10.0 % y 5.2 %, respectivamente). Además ambos horizontes son de color oscuro. Dadas las características fluvénticas del perfil P15, no se descarta la posibilidad del origen en P1, sin embargo, en P1 no es evidente el material fluvéntico. Aunque no se exploró el área para saber si este material suelo está presente en las demás depresiones o es de carácter puntual. Requiriéndose prospección de campo, análisis químico para detectar amorfos y la identificación de los mismos por DR-X, lo que aclararán las dudas de la presencia o no de

ceniza o si se trata de material carbonatado en P15 y además con yeso (28 %) en P1. En el horizonte de P1 son más evidentes los procesos edafogénicos.

**Costra salina.** En el pedión P8 se caracteriza por presentar costra salina, presentando varias bandas, cada una podría representar un periodo de encostramiento (Figuras IV.214 a IV.216). Dicha costra se caracteriza por revestimientos limo-carbonáticos en casquetes enlazados (Figuras IV.235 y IV.236), y porosidad muy alta (60 %) debido a los espacios dejados al disolverse las sales que los ocupaban, posiblemente ocurrido durante el secado o impregnación de la muestra (Eswaran *et al.*, 1981), o quizás durante el desbastado.

El suelo debajo de la costra (espesor de 3 a 4 cm) o sección b del pedión P8 (Figura IV.214, corresponde a la segunda área del suelo más afectada, después de la costra, por los ciclos humedecimiento-secado. Esto se evidencia por la existencia de revestimientos casquetes enlazados de la parte superior o en contacto con la costra, y porque casi todos los granos de yeso se encuentran fracturados y orientados al azar, solamente unos cuantos están ligeramente alineados en forma paralela a la parte más cercana a la costra. A esta profundidad se encuentra la mayor cantidad de nódulos, varios de ellos anórticos, es decir constituye una segunda costra o subcostra.

**Halita.** En la costra de P8 se encontró en forma aislada un grano isótropo posiblemente de halita (Figuras IV.219 y IV.220). No se encontraron más debido a la rápida disolución de la halita (Eswaran *et al.*, 1980). El yeso es 183 veces y la halita 25 000 veces más solubles que la calcita en agua destilada a 20 °C (Jakucs, 1977). Ello dificulta mucho su detección en estado cristalino, y su pérdida puede ocurrir durante el secado o impregnación de la muestra (Eswaran *et al.*, 1981). Para evitar su disolución es necesario tratar al suelo en forma especial, por ejemplo Hanna y Stoops (1978; cita Eswaran *et al.*, 1981) emplearon keroseno durante el cortado de las secciones delgadas, y Amit y Yaalon (1996) en campo aislaron los bloques de suelo con cera líquida antes de su extracción y después los impregnaron con poliestireno al bajo vacío logrando preservar las sales.

El ejemplar encontrado es prismático, aunque no se descarta la posibilidad de la existencia de otras formas, ya que Eswaran *et al.* (1980) utilizando microscopio electrónico de barrido, encontraron varios hábitos en costras salinas y horizontes sálicos, tales como pulverulento, prismático, cúbico, fibroso acicular e inclusive revestimientos de halita de hábito amorfo o aspecto ceroso sobre paredes de huecos y agregados. En suelos salinos en el Delta de Río Nilo, Egipto, Hanna y Stoops (1976) encontraron halita alargada yuxtapuesta, y también la reportan como revestimientos de agregados y en los huecos, agregan que los revestimientos de halita son raramente reportados debido a que tienden a irse con la solución durante la impregnación con resina, y que además es cuestionable la existencia de dichos revestimientos en suelo en condiciones naturales, ya que pueden ser artefactos producidos por eflorescencias durante el secado al aire de la muestra.

**Sepiolita** En el perfil P1 la composición mineral de los dos primeros horizontes es muy similar. Mediante análisis por DR-X se encontró yeso, sepiolita y calcita con poco de cuarzo en el segundo. En el último horizonte solamente se identificó yeso. Soria *et al.* (2000) mediante microscopía electrónica de transmisión reportan sepiolita ( $Mg_4Si_6O_{15}(OH)_2 \cdot 6H_2O$ ; Besoain, 1985) en un suelo yesoso de Villa Hidalgo, San Luis Potosí. En las secciones delgadas de P1 no se detectó sepiolita, solamente yeso, calcita, cuarzo y máficos. Las cenizas podrían explicar la presencia de sepiolita como segundo componente después del yeso en los dos primeros horizontes de P1.

La sepiolita junto con la paligorskita o atapulgita constituyen el grupo de minerales de arcilla fibrosos. La sepiolita no es muy difundida, pero se ha encontrado en suelos, sedimentos lacustres, en mares profundos, en depósitos salinos y carbonáticos (Besoain, 1985). Para su formación se requieren condiciones áridas, alcalinas, elevadas concentración de magnesio y silicio y bajo contenido de aluminio, o alteración de cenizas volcánicas y basaltos. Sánchez *et al.*, (1978) en la isla Gran Canaria (España) reportan sepiolita en suelos formados a partir de basalto. A unos 20 km del perfil existe basalto (CRM, 1999), este caso podría ser la fuente de los materiales necesarios para la formación de la sepiolita, tal como la reportada en Yucatán, México por Schultz *et al.* (1971; citados por Besoain, 1985).

En el suelo la sepiolita se puede ser neoformada en condiciones áridas, con precipitación media anual inferior a 300 mm y calcáreas. Condiciones que no se cumplen en el sitio de P1, ya que la precipitación es más alta (unos 400 mm) aunque sigue siendo árido y la cantidad de carbonatos tampoco es muy alta. Además en los primeros dos horizontes de P1 hay calcita y cuarzo, y el magnesio soluble es ligeramente mayor en el segundo horizonte respecto al primero, sin embargo la cantidad de magnesio soluble (22.8 y 57.5 mmol/l, primero y segundo horizonte) o intercambiable (7 y 10 cmol<sub>(+)</sub>/kg, primero y segundo horizonte) no es alta. Este suelo tampoco es alcalino. Las características anteriores no muy favorables para la formación de sepiolita, pueden indicar posible formación anterior a las condiciones actuales o incluso podría ser heredada, sin embargo no se tienen datos de su presencia en las rocas de los alrededores.

**Calcita pseudomorfa lenticular.** Tanto en P6 como en P8 hay nódulos con calcita precipitada en huecos dejados por el yeso, adquiriendo su forma una vez que llenan el hueco y considerados pseudomorfos de yeso lenticular (Figuras IV.208 a IV.211, IV.237 a IV.239). La micromasa de los nódulos es calcita micrítica o microesparítica, y dada la mayor estabilidad de la calcita (Jakucs, 1977; Eswaran *et al.*, 1981; Porta, 1996), se disuelve primero el yeso lenticular conservándose la forma, y posteriormente o al mismo tiempo el espacio va siendo ocupado por la calcita. Becze-Deák *et al.* (1997) mediante análisis por microsonda demuestran que cristales similares a los encontrados en el presente estudio están constituidos por calcita con trazas de azufre, para estos autores, hecho indicador de cambios locales de los parámetros climáticos. Sullivan (1990) reporta agregados calcíticos lenticulares e incluso en cola de golondrina con exfoliación bien desarrollada.

Sullivan (1990) reporta dos mecanismos de formación de los pseudomorfos, por alteración indirecta (disolución del yeso seguido por precipitación de calcita) y por alteración directa (reemplazo molecular del yeso por calcita). En el primer caso primero se forma el hueco y en el segundo en ningún momento hay espacios vacíos. En los pediones estudiados se tienen huecos lenticulares vacíos, con calcita recristalizada en forma densa completa o incompleta, por lo que correspondería al modo de formación indirecto. Además, Sullivan (1990) encontró pseudomorfos calcíticos lenticulares aislados o sin soporte diciendo que su formación fue por proceso directo, y los de los

pediones P6 y P8 están rodeados por calcita micrítica, la cual mantiene la figura o molde del yeso el tiempo suficiente como para que se rellene con la calcita.

La disolución del yeso puede ser debido a la acción de bacterias en ambientes de reducción (Lattman y Lauffenburger, 1974; citados por Becze-Deák *et al.*, 1997), implicando condiciones de inundación o de saturación de agua. En el sitio P8 y principalmente en la época de lluvias, se pueden presentar condiciones de reducción por ascenso del nivel freático, sin embargo en el pedión P6 esta condición no se presenta ya que el perfil se excavó hasta más de 2 m sin encontrar evidencias de reducción.

Los pseudomorfos de calcita también pueden haberse formado como resultado de transformaciones fisicoquímicas (Becze-Deák *et al.*, 1997), tal como el posible movimiento descendente de solución del suelo saturada en calcita pero capaz de disolver al yeso por efecto del ión común (Wigley, 1973; citado por Sullivan, 1990). Hamdi-Aissa (2002) reporta precipitación de calcita en el desierto del Sahara, Ouargla, Argelia, después del yeso lenticular y dice que se debió a la degradación del yeso durante periodos de baja evaporación y entrada de agua de lluvia dulce, seguida de acreciones de calcita en ambientes con nivel freático alto, baja salinidad, alta  $p\text{CO}_2$  y con más vegetación o productividad biológica alta.

**Celestina.** En la tercera parte de la primera lámina del pedión P8 (Figura IV.214) así como en el segundo horizonte de este mismo pedión hay celestita alargada, birrefringente, dispuestos en forma de nido y sin orden (Figuras IV.231 a IV.234). Este mineral también ha sido reportado por Soria (2004) para un suelo yesoso de la Zona Media ubicado a unos siete kilómetros del pedión P8. También fue reportado en suelos yesosos del valle del Ebro (España) por Herrero (1991). Lo cual indica que es un mineral sino común, sí factible de encontrar en suelos ricos en yeso.

**Inclusiones en el yeso.** En los granos de yeso es común encontrar inclusiones de masa basal a manera de líneas de polvo o de áreas ocurridas durante su cristalización. Por ello su composición está relacionada al medio en que se formó el yeso, pudiendo ser de arcilla (Allen, 1985; Arricibita *et al.*, 1988; Poch, 1998), halita (Stoops *et al.*, 1978; Eswaran y Zi-Tong, 1991), micrita (Porta, 1986), entre otros. En el pedión P8 y posiblemente en P3 y P6, después del yeso hay arcilla esmectita, calcita y halita por lo

que es posible que las inclusiones (Figuras IV.202, IV.203, IV.223 a IV.230) sean de la misma naturaleza. En P1 hay sepiolita y calcita por lo que las inclusiones pueden tener tal composición. Estas áreas se constituyen en líneas de debilidad por las cuales se empieza a disolver (Eswaran *et al*, 1981) o a fracturar (Artieda, 1996) el yeso, tal como se muestra en las Figuras IV.227 a IV.230, en las últimas se aprecia la naturaleza micrítica de la inclusión.

**Hábito del yeso.** Los procesos de disolución y recristalización son muy importantes en los cuatro pediones, lo cual se constata con la presencia de granos de yeso con los bordes ondulados debido a que en el proceso de corrosión se separan granos de yeso de hábito lenticular (Figuras IV.202 y IV.203), a la presencia de cristales de yeso rodeando a los más grandes, o por nódulos de yeso lenticular rodeados de yeso microcristalino. También hay recristalización de yeso lenticular de color blanco “lechoso” o “perlado”, de aspecto límpido lo cual indica su reciente formación (Eswaran *et al.*, 1981; Stoops y Ilaiwi, 1981).

En los cuatro perfiles el tamaño de los cristales de yeso se incrementa con la profundidad, esto se puede deber a que en la parte superior del perfil los procesos de secado-humectación son más frecuentes, debido a la mayor influencia del viento, lluvia, evaporación, etc. Es decir hay menor estabilidad en el clima del suelo, por lo tanto los ciclos disolución-precipitación son más frecuentes, y según Cody (1979) tasas de evaporación bajas originan desarrollo lento y cristales más grandes, condiciones que se reúnen conforme se profundiza. Cody y Cody (1988) encontraron que la densidad de nucleación del yeso decreció con el incremento de NaCl y ascenso de la temperatura, y con el tiempo se incrementó el peso del yeso. Agregan que, sin embargo cuando se combina alta salinidad con alta temperatura se incrementan los centros de nucleación.

**El hábito lenticular.** Este hábito, como el de las Figuras IV.227 a IV.230, según Cody (1979) se forma por la presencia de compuestos de naturaleza orgánica que originan crecimiento rápido en forma paralela y lento perpendicularmente al eje c, con lo cual se tiene un grano con cociente longitud/anchura muy pequeño. Este autor agrega que no es necesaria una solución salina ni alta temperatura para la formación del yeso lenticular. Las caras curvas se pueden originar por la presencia de impurezas, tal como el cloruro de sodio (Deicha, 1946; citado por Jafarzadeh y Burham, 1992), sin embargo Jafarzadeh

y Burham (1992) en laboratorio produjeron yeso lenticular en ausencia de materia orgánica y caras curvas sin presencia de NaCl. Cody y Cody (1988) en laboratorio en una solución sometida a 23 °C y 30 % de salinidad promovieron la formación de yeso lenticular.

**Hábito prismático y en punta de flecha.** Cody (1979) en soluciones saturadas en yeso y con adición de sales monovalentes (NaCl, KCl, NaNO<sub>3</sub>) desarrolla cristales prismáticos muy alargados en forma paralela al eje c. Porta (1986) obtiene cristales lenticulares de yeso al evaporar una solución en presencia de restos orgánicos, y en ausencia de éstos se forman cristales prismáticos alargados o tabulares. En el pedión P8 se tienen condiciones salinas (CE<sub>es</sub> 13 a 60 dS/m) lo cual concuerda con la presencia de cristales prismáticos muy alargados (Figuras IV.221 y IV.222), la materia orgánica es muy baja (0.06 %) en el primer horizonte mas no en el segundo (2.2 %), aunque en campo no hubo reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %; microscópicamente se identificó manto fúngico (<< 1%) y muy escasos revestimientos de materia orgánica (<< 1 %). Los cristales prismáticos del perfil P8 son similares al hábito prismático semi-bipiramidal de Cody y Cody (1988) o al prismático pinacoidal simple de Jafarzadeh y Burham (1992). En P8, incluso los de hábito en punta de flecha son muy alargados.

Algunos de los granos de yeso prismáticos del perfil P8 (Figuras IV.221 y IV.222) es posible que correspondan a fragmentos de los de hábito en punta de flecha. En la Figura IV.240 (después del presente párrafo) se muestran dos granos de yeso con macla en punta de flecha parcialmente divididos o fragmentados. El de la parte superior (A) se dividió en dos generando un grano en punta de flecha, y la otra parte puede sufrir una nueva fragmentación por el eje más largo separándose en dos granos de hábito posiblemente prismático. El grano del centro (B) se fragmentó en un grano de yeso prismático subhedral. Los cristales prismáticos están orientados verticalmente debido a que crecen en dirección a las áreas que ofrecen menor resistencia. Sin embargo, cuanto más largo es el cristal más frágil es, y por lo tanto son más susceptibles a la presión ejercida por el crecimiento de otros cristales con la consecuente fragmentación.

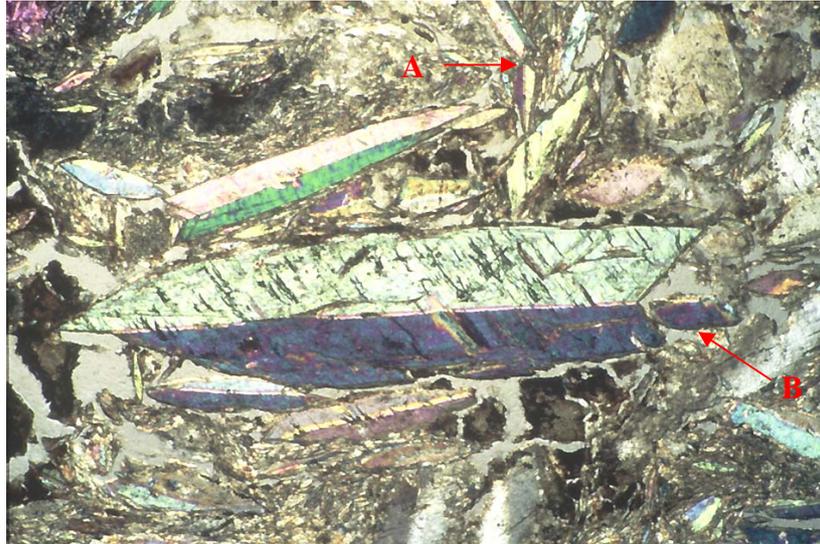


Figura IV.240, LPC. Granos de yeso con macla en punta de flecha parcialmente fragmentados, fragmentados (A y B) originando uno en punta de flecha y en prismático subhedral. Lado mayor 6.8 mm.

En relación a la fragmentación del yeso Artieda (1996) apoyado en la teoría de disolución inducida por colisión de Dronkert (1981) y en la susceptibilidad del yeso a la exfoliación a lo largo de la doble capa de moléculas de agua que separan los planos estructurales adyacentes sostenido por Klima y Nancollas (1987), plantea que la cristalización del yeso provoca presiones capaces de romper los cristales formados según los planos de exfoliación. Lo anterior se puede aplicar a lo que sucede con los cristales de yeso lenticular y con macla en punta de flecha, es posible que cuanto más largo sea el grano sea más frecuente la fragmentación por colisión.

En los primeros 5 centímetros del pedión P8 se tiene mayor efecto de la evapotranspiración o el ciclo humectación-secado es mas frecuente. Se tienen más núcleos de formación de yeso y el desarrollo del grano es mas rápido, y a la vez existe más presión por la misma cristalización del yeso. Por ello los granos son más pequeños y por lo tanto más fragmentados y con mayor desorden a esta profundidad.

**5.3.2. Suelos con horizonte yesoso somero, fase salino-sódica.** En esta presentación se incluye el perfil P3. Se caracteriza por relieve general plano con microdepresiones, generalmente centimétricas, se anega en la época húmeda sobre todo con las lluvias torrenciales. El agua puede permanecer en superficie horas o días según volumen de agua precipitado y la intensidad de la misma. En este pedión la salinidad es alta lo mismo que la sodicidad. El perfil P3 se sitúa a unos 1 500 m al suroeste del poblado San Bartolo, Rioverde.

**P3.A. Clasificación y características del sitio.**

Soil Survey Staff, 1999: Haplogypsis sódico, limoso grueso, gypsico, térmico.

WRB, 1999: Solonchak sódico, gípsico.

Uso: Apacentamiento de ganado mayor y menor (agostadero), sobreexplotado.

Relieve: Plano con depresiones centimétricas.

Flora: Vegetación halófila (*Suaeda nigrecens*, *Atriplex canescens*, *Buchloe dactyloides*), pasto *Bouteloua chasei*, y Matorral desértico *Prosopis laevigata*, *Acacia sp*, *Opuntia sp*.

Erosión: Área con aportes, inundable temporalmente en época de lluvias.



Figuras IV.241 y IV.242. Sitio y perfil P3. Vegetación halófila (*Suaeda nigrecens*, *Atriplex canescens*, *Buchloe dactyloides*) y matorral desértico (*Prosopis laevigata* y *Acacia sp*).

**P3.B. Descripción macromorfológica.**

A. Profundidad 0 – 5 cm. Ligeramente húmedo. Color en seco 10YR 4.5/2 y en húmedo 10YR 3/2. Textura arcilla. Consistencia en seco blando, en saturado muy pegajoso y plástico. Estructura laminar. Raíces finas abundantes y medias comunes, sobre las caras de los agregados. Pocos poros finos pocos y medios. Sin reacción al HCl al 10 % y muy leve al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Permeable. Con buen drenaje. Transición marcada y límite horizontal.

Yzn. Profundidad 5 – 15 cm. Húmedo. Color en seco 10YR 7/3 y en húmedo 10YR 6/3. Textura franco arenoso. Consistencia en seco muy duro y en saturado ligeramente plástico y pegajoso. Estructura de bloques angulares bien desarrollados aproximadamente de 5 cm. Raíces muy finas y medias abundantes, todas están sobre las caras de los agregados. Poros canales finos abundantes. No hay reacción al HCl al 10 % y muy leve al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Permeable. Buen drenaje. Transición tenue y límite horizontal.

Yz. Profundidad 15 – 90 cm. Húmedo. Color en seco 10YR 8/2 y en húmedo 10YR 6.5/3. Textura franco arenoso. Consistencia en seco muy duro y en saturado plástico y adherente. Estructura laminar y masiva. Raíces sobre las caras de los agregados. Poros finos y medios muy pocos. Sin reacción al HCl al 10 % ni al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Poco permeable. Drenaje deficiente. Se encuentran motas de unos 3 mm, blancas.

Tabla IV.15. Resultados de los análisis físicos y químicos, Pedión P3.

Profundidad cm	Horizonte	Tamaño de partículas, %			pH H <sub>2</sub> O 1:2.5	MO %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/kg suelo	CEes dS/m 25 °C	Cationes solubles mmol/l extracto				RAS
		Ar	L	Ac					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
5-15	Yzn				7.9	0.94	72.0	25.5	19.8	53.4	40.8	146.0	24.3
15-90	Yz				8.1	0.62	38.0	22.3	14.85	184.0	32.2	107.0	10.8

Profundidad cm	Horizonte	CaCO <sub>3</sub> Total %	Yeso %	CIC cmol/kg suelo	Cationes intercambiables, cmol/kg suelo				PSI	Da g/cc
					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>		
5-15	Yzn	1.2	17.4	33.8			6.3	10.0	29.6	1.16
15-90	Yz	1.3	25.5	-			3.22	4.9	12.8*	-

\* PSI obtenido a partir de la RAS.

### **P3.C. Descripción micromorfológica**

**P3.C.1. Microestructura.** En el primer horizonte la pedialidad es fuerte a moderada. En los primeros 4 cm hay estructura laminar-granular con dos tamaños de agregados, los más grandes (15 %, 0.2 a 2 cm) corresponde a bloques subangulares parcialmente acomodados. Los otros agregados son de tamaño  $\leq 150 \mu\text{m}$ , son sub-esferoidales a esferoidales y subangulares a subredondeados. Conforme disminuye el tamaño son más esferoidales y redondeados. De los 4 a los 7 cm es granular compuesta con tamaño de agregados entre 0.02 y 0.15 mm. Los más grandes (10 %) son porosos y los demás son esferoidales subredondeados. En los últimos 1.5 cm de la primera lámina los agregados son bloques (0.08-3.0 cm) subangulares porosos, con estructura esponjosa. En promedio es granular compuesta.

En el segundo horizonte la pedialidad es moderada. La estructura es laminar con cámaras. Los agregados ( $< 1.5 \text{ cm}$ ) son bloques subangulares; son frecuentes los de forma alargada y dispuestos horizontalmente. El tercer horizonte tiene débil pedialidad con estructura laminar ondulada.

**P3.C.2. Huecos.** En el primer horizonte la porosidad es del 30 %, correspondiendo a poros de empaquetamiento compuesto (20 %, 25-200  $\mu\text{m}$ ), fisuras horizontales (7 %, 0.5-3.32 mm), vesículas (2 %, 80-160  $\mu\text{m}$ ), y cámaras (1 %, 0.5-2.0 mm), todos los poros son de paredes lisas; la microestructura en general es granular compuesta. En el segundo horizonte la porosidad es menor (25 %) y consiste de fisuras horizontales (17 %, 40 – 1000  $\mu\text{m}$ ), canales (3 %, 3-5 mm), cámaras (4 %, 0.5-6.2 mm) y vesículas (1 %, 0.07 – 0.25 mm), todos los huecos con paredes onduladas a rugosas. La microestructura es laminar con cámaras.

En el tercer horizonte la porosidad disminuye al 20 %, y predominan las fisuras horizontales onduladas (15 %, 50-250  $\mu\text{m}$ ) y vesículas (5 %, 80-500  $\mu\text{m}$ ), las paredes de los huecos son rugosas o aserradas. La microestructura es laminar con vesículas.

**P3.C.3. Componentes orgánicos.** En el primer horizonte predominan las raíces activas (0.25-0.8 mm, Figuras IV.243 y IV.244) o inactivas, las primeras son birrefringentes y de color amarillo a amarillo tenue en LPP. Las raíces inactivas son de color pardo rojizo

en LPC y pardo amarillento en LPP. También son frecuentes los restos de tejido parenquimatoso de color pardo rojizo o pardo oscuro en LPC y pardo amarillento en LPP. No se aprecia actividad de oribátidos ni de lombrices. En el segundo horizonte son muy raras las raíces, y estas son más pequeñas (0.15 mm). En el tercer horizonte no se detectaron componentes orgánicos.

#### **P3.C.4. Masa basal.**

**P3.C.4.1. Material grueso.** En el primer horizonte la relación grueso/fino es 3/7. Predomina el yeso anhedral a subhedral (15 %, 0.02-1.0 mm), con líneas de polvo y con bordes corroídos u ondulados. Le sigue en importancia el cuarzo límpido con tamaño variado (8%, 50-250  $\mu\text{m}$ ), mal clasificado; la calcita representa un 3 %, (0.03-0.09 mm); los minerales máficos también constituyen el 3 % (0.09 mm); existen raros elementos de plagioclasa y olivino (< 1%). La distribución relativa g/f es porfírica abierta.

En el segundo horizonte la relación grueso/fino es de 2/3. Predomina el yeso (35 %) lenticular y con macla en cola de golondrina o punta de flecha. El tamaño del yeso lenticular varía de 0.02 a 0.2 mm, y el de cola de golondrina de 0.05x1.0 mm a 0.4x2.0 mm. La mayor parte de los granos de yeso presentan líneas de polvo y corrosión radial, transversal o longitudinal (Figuras IV.245 y IV.246); casi todos los granos de yeso, en las tres láminas, sufrieron deshidratación en el proceso de obtención de la sección delgada, por lo que se consideran artefactos (Figuras IV.247 y IV.248). Sobre algunos granos de yeso se presentan otros cristales isótropos prismáticos (Figuras IV.249 y IV.250), de alto relieve y en algunos casos están revestidos del material isótropo, estos minerales también se presentan en nódulos órgano-minerales (Figuras IV.251 y IV.252), pueden corresponder a fitolitos. Los otros minerales presentes son el cuarzo límpido (5 %, 125 – 300  $\mu\text{m}$ ) tamaño arena fina a arena media. La distribución relativa es porfírica espacio simple y de espacio doble.

En la lámina del tercer horizonte la relación g/f es de 3/2. Predomina el yeso lenticular (30 %, 0.02-0.25 mm) euédral con o sin alteración, paralelo a poros y granos más grandes. El yeso xenomórfico está presente en fisuras horizontales y constituye el 20 %, está menos alterado que el yeso lenticular. El 10 % es yeso en punta de flecha o cola de golondrina, con líneas y áreas de polvo, el tamaño varía de 0.25x1.0 a 0.5x3.0 mm, algunos con acreciones en los extremos. La distribución relativa g/f es porfírica cerrada.

**P3.C.4.2. Material fino.** En el primer horizonte el material fino es de color pardo amarillento punteado en LPP y pardo birrefringente en LPC, constituida de material limo-carbonático, arcilla y materia orgánica, con fábrica-b micrítica. En el segundo y tercer horizonte es amarillenta con diafragma cerrado en LPP y gris en LPC. Corresponde a una fábrica-b microgíptica.

### **P3.C.5. Edaforragos**

**P3.C.5.1. Revestimientos.** En el primer horizonte son pocos los revestimientos típicos de materia orgánica en poros, agregados y cristales. Otros revestimientos típicos y raros posiblemente de manganeso sobre agregados o cristales. En el segundo horizonte son raros los revestimientos típicos de materia orgánica. También son frecuentes los revestimientos arcillo-limosos, birrefringentes, pardo amarillentos en LPC y pardos en LPP, en poros y sobre cristales de yeso (Figuras IV.253 y IV.254). Los revestimientos típicos de material limo-carbonático son ocasionales. Son frecuentes los revestimientos típicos de yeso microcristalino en poros y cristales de yeso grandes.

En el tercer horizonte los revestimientos de materia orgánica prácticamente desaparecen y solamente son ocasionales sobre agregados. Hay muy raros revestimientos de micrita. Son frecuentes los revestimientos de yeso lenticular euhedral o xenomorfo paralelo al poro. Hay muy raros revestimientos en poros de yeso tabular o pseudotabular de unos 45-60  $\mu\text{m}$  de ancho y de 80 a 100  $\mu\text{m}$  de largo (Figuras IV.255 y IV.256).

**P3.C.5.2. Rellenos.** En el horizonte superficial son raros los rellenos densos completos e incompletos de yeso lenticular hipidiomórfico y xenomórfico, principalmente en poros fisura; otros rellenos son de masa basal en cámaras y canales. En el segundo horizonte se tienen cámaras ( $\leq 3.5$  mm) con rellenos densos completos o incompletos de masa basal. Un canal (2 mm) presenta relleno suelto incompleto en forma arqueada correspondiendo a actividad de lombrices. En algunas cámaras se mezcla material basal yesoso con material fino; el último está fragmentado, es limo arcilloso de color pardo amarillento a pardo rojizo muy similar a la micromasa del horizonte superior, birrefringente, descalcificado y fábrica-b interna indiferenciada y grano estriada. En el tercer horizonte los rellenos son prácticamente de yeso indentado. Son raros los rellenos suelto incompleto de masa basal y material limo arcilloso birrefringente y fábrica-b granoestriada.

**P3.C.5.3. Nódulos.** En los primero cuatro cm de la primera lámina predominan los nódulos amorfos de color pardo amarillento con fábrica-b esponjosa. También son frecuentes los nódulos órticos típicos (250 - 350  $\mu\text{m}$ ) de yeso lenticular hipidiomórfico o xenomórfico, y los de yeso microcristalino (150 – 400  $\mu\text{m}$ ). Otros nódulos raros son de micrita con fábrica-b vesicular. Los nódulos impregnativos de materia orgánica son raros.

En el segundo horizonte son raros los nódulos órticos típicos de yeso lenticular y material limo-arcilloso birrefringente. Son comunes los nódulos (75 – 150  $\mu\text{m}$ ) órticos de material arcillo-limoso birrefringentes.

En el tercer horizonte son raros los nódulos órticos típicos de yeso lenticular y material limo-arcilloso birrefringente. Son frecuentes los nódulos órticos típicos de material arcillo-limoso birrefringentes, (60 – 150  $\mu\text{m}$ ). Se tiene un nódulo de 1.5 mm, cuyo centro consta de yeso lenticular hipidiomórfico o xenomórfico y está rodeado de yeso microcristalino (Figuras IV.257 y IV.258). También son frecuentes los nódulos típicos de yeso xenomórfico, (150 – 500  $\mu\text{m}$ ).

**P3.C.6. Excrementos.** En el primer horizonte no se detectaron excrementos. En el segundo y tercer horizonte, son escasas las excretas fecales curvadas constituidas de masa basal, corresponden a lombrices y son más frecuentes en el segundo horizonte.

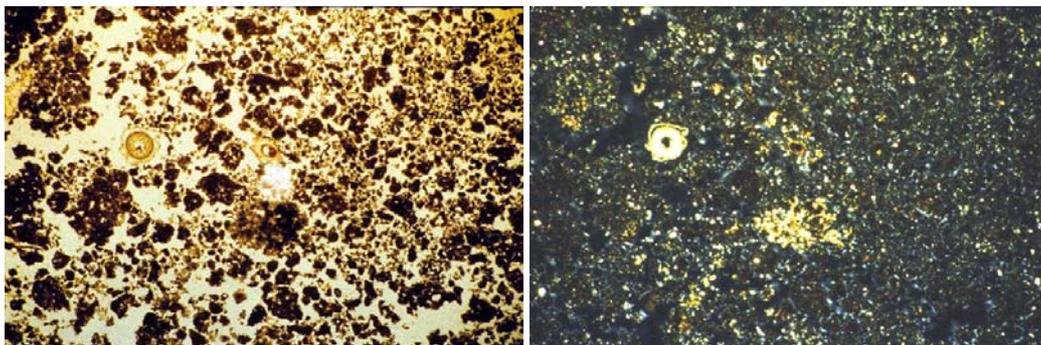
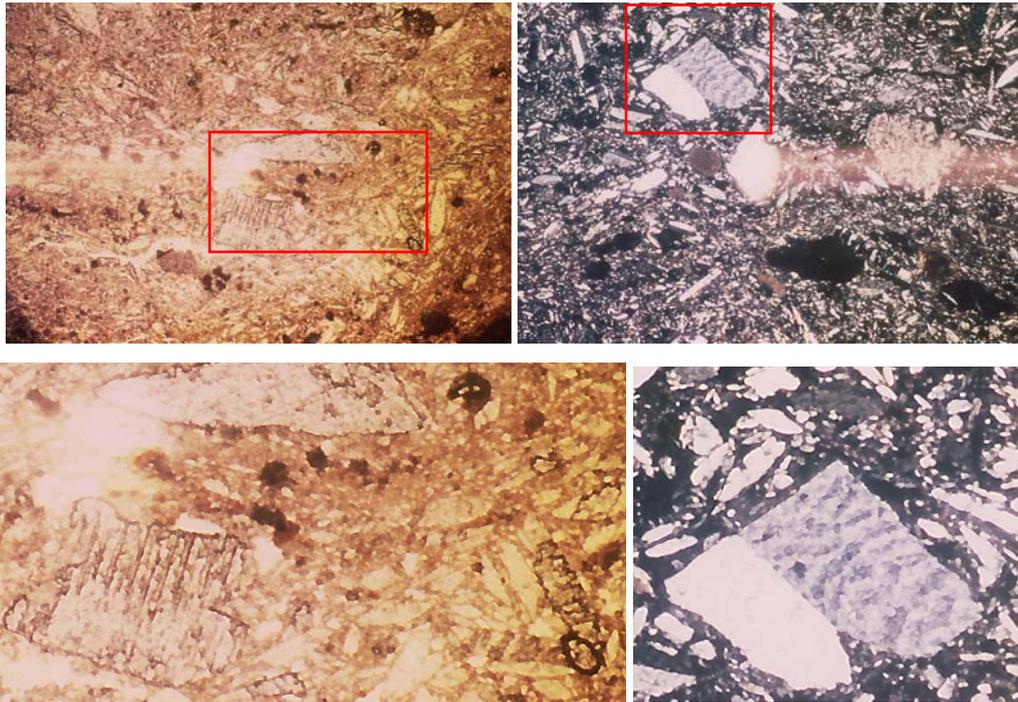
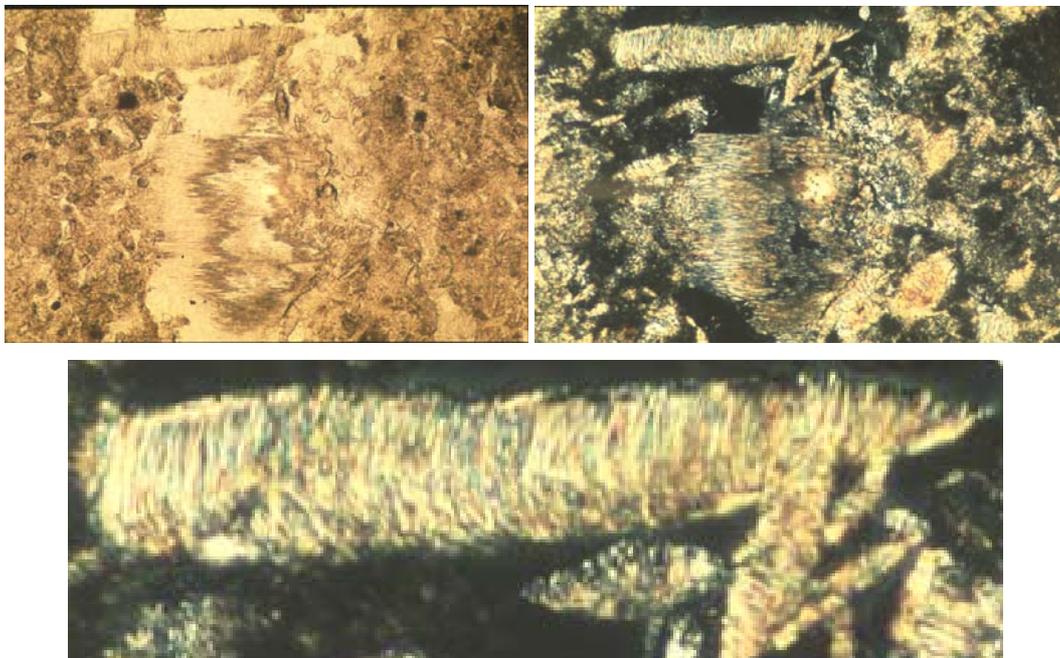


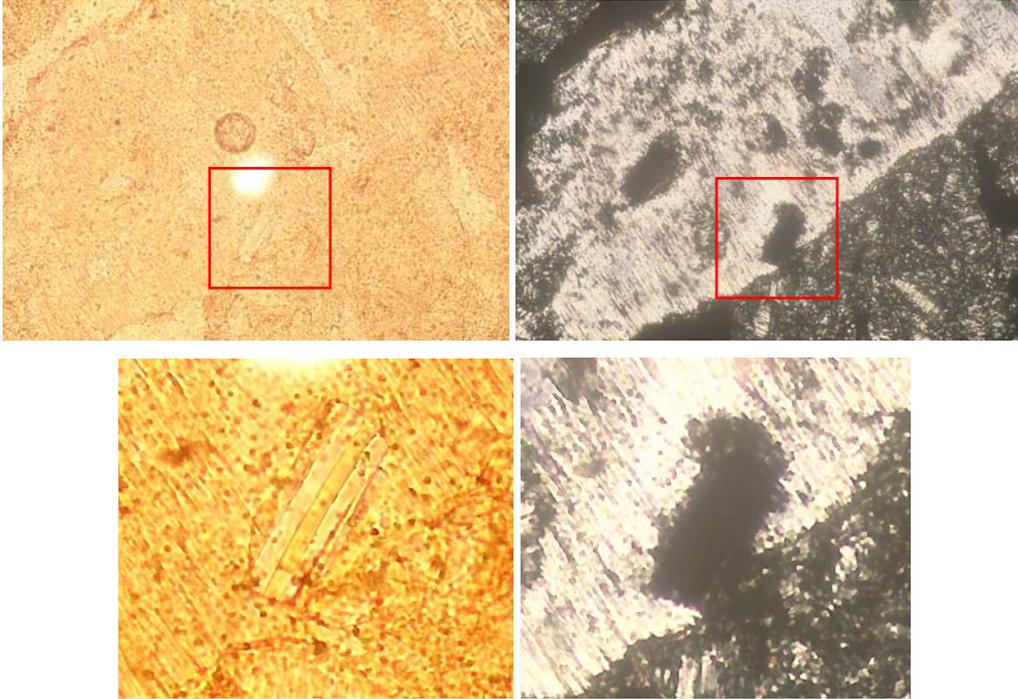
Figura IV.243, LPP y IV.244, LPC. Raíz activa. Estructura granular, huecos de empaquetamiento Lado mayor 6.8 mm



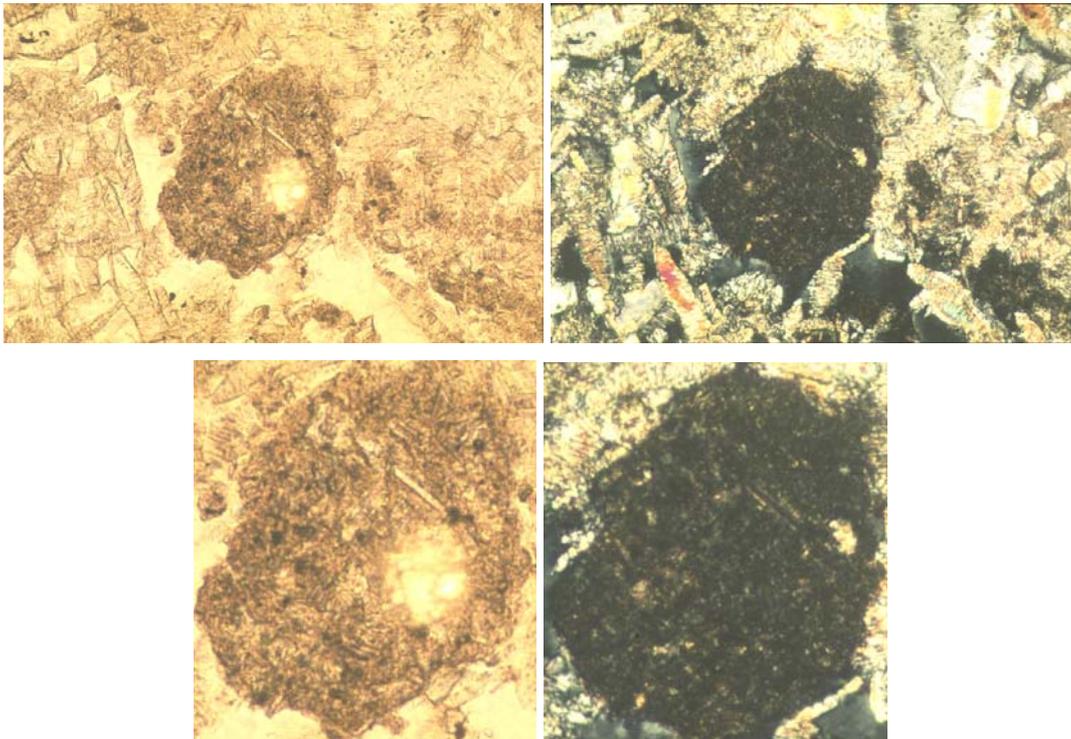
Figuras IV.245, LPP y IV.246, LPC. Diversas formas de corrosión (horizontal, longitudinal, bandas, áreas o islas micríticas, Porta, 1986) del yeso lenticular, o con macla en punta de flecha. Yeso en punta de flecha fragmentado. Lado mayor 6.8 mm.



Figuras. IV.247, LPP y IV.248, LPC. Deshidratación severa presente en todas las láminas de este perfil. Bassanita sintética (Artieda, 1996), considerada como artefacto. Lado mayor 1.1 mm.



Figuras IV.249, LPP y IV.250, LPC. Posible fitolito asociado a material isótropo, sobre yeso con macla en punta de flecha. Lado mayor de 0.55 mm. Profundidad 5-15 cm



Figuras IV.251, LPP y IV.252, LPC. Fitólitos sobre nódulo organo-mineral descalcificado. Lado mayor de 1.1 mm.

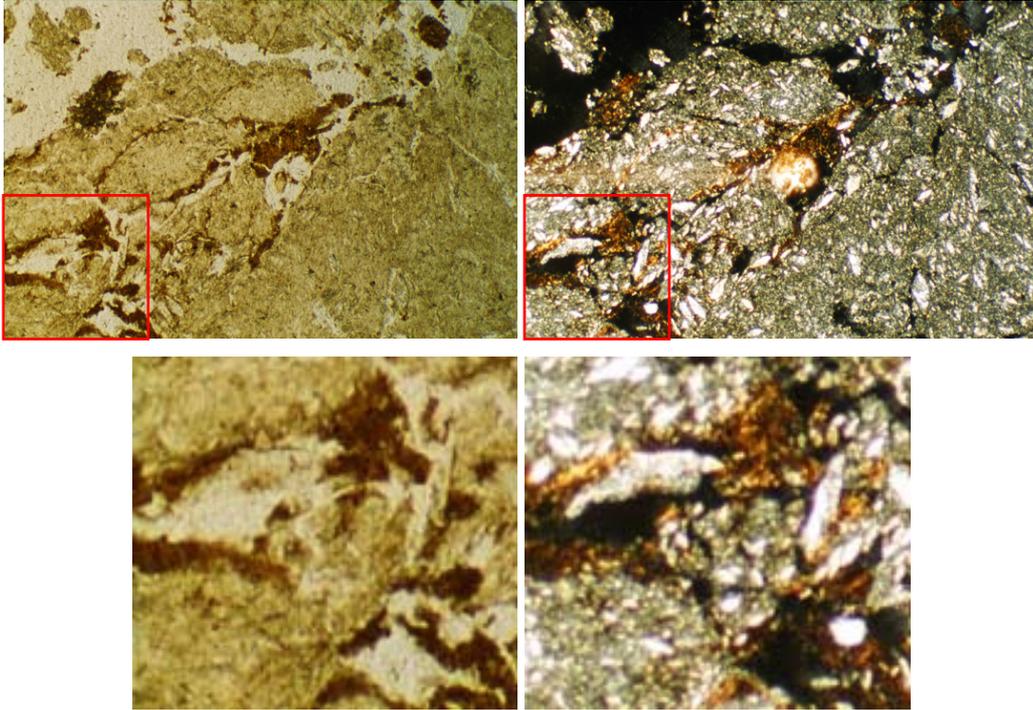
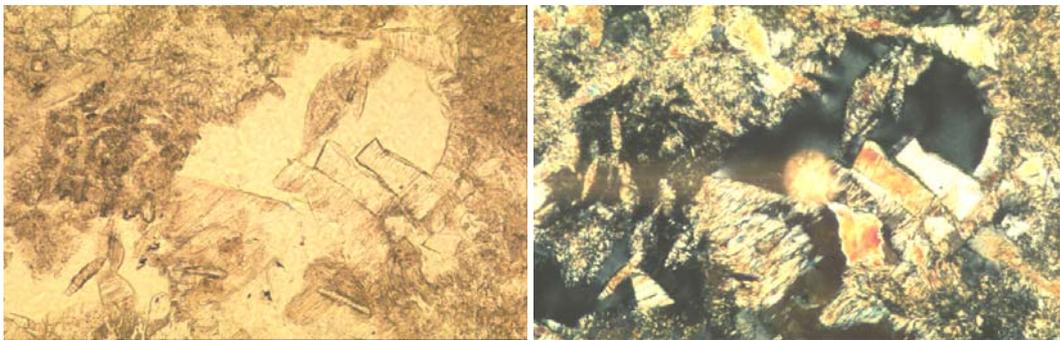
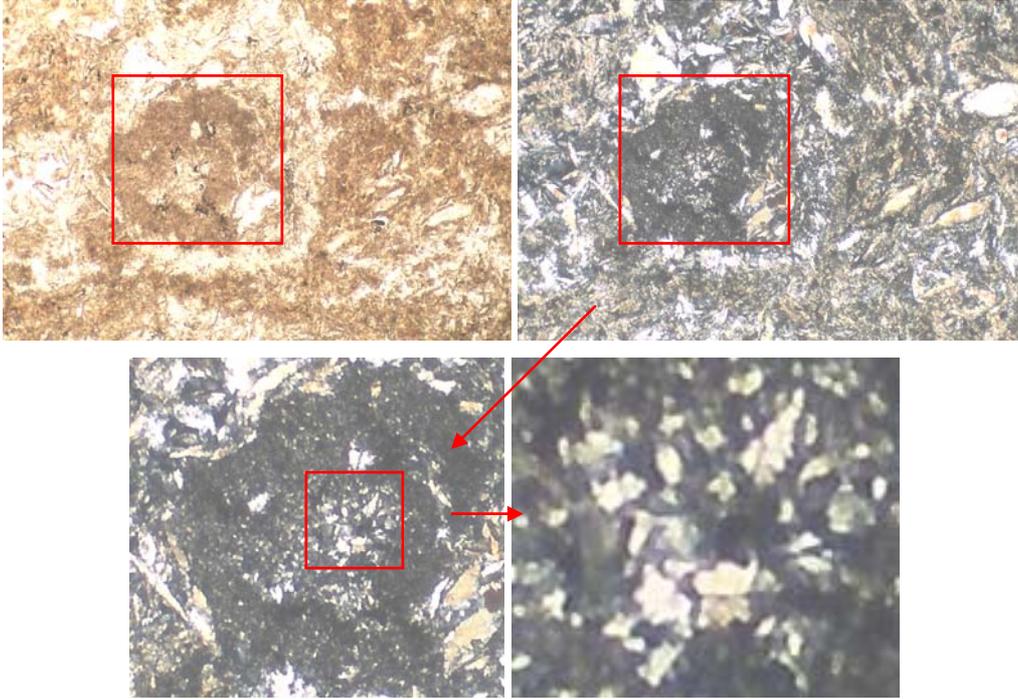


Figura IV.253, LPP y IV.254, LPC. Rellenos y revestimientos limo-arcillosos sobre cristales de yeso. Lado mayor 3.4 mm.



Figuras IV.255, LPP y IV.256, LPC. Yeso pseudo tabular-prismático o posibles trozos de yeso con macla en punta de flecha dentro de un poro a manera de revestimiento. Colores altos debido a lámina gruesa. Todos los granos están deshidratados, por lo que se consideran artefactos. Lado mayor de 1.1 mm.



Figuras IV.257, LPP y IV.258, LPC. Nódulo de yeso microcristalino con yeso xenomórfico en el centro (posiblemente yeso roca) y yeso lenticular rodeando al nódulo. Lado mayor de 3.4 mm.

**D. Interpretación.** Este perfil no tiene rasgos edafogénicos diferentes a los de los suelos de la fase salina. No se encontró halita, ni sepiolita, ni celestina, ni calcita pseudomorfa lenticular. Además el hecho de que las tres láminas delgadas estén alteradas debido a alguna etapa del proceso de obtención, enmascara y dificulta la identificación de posibles rasgos edafogénicos, tales como las inclusiones en los granos de yeso.

Lo que resalta más de este suelo es la costra salina, la cual no es tan característica como la descrita en el Pedión P8 (apartado anterior), apreciándose la estructura laminar y esponjosa y suelta característica de las áreas sódicas. Lo que diferencia al Pedión P3 de P8, es que en el primero se infiere mayor influencia de las corrientes superficiales, ello por la forma redondeada o subredondeada de algunos granos de yeso y de calcita, lo cual implica movimiento en superficie, aunque también pueden ser de origen eólico. En campo se constató mayor incidencia de la escorrentía superficial e inundación en P3 que en P8.

**Hábitos del yeso.** Otra de las diferencias con P8 es que en el pedión P3 predomina el yeso lenticular, y la frecuencia del yeso maclado en punta de flecha es mucho menor que en P8. Además el grano de yeso es más pequeño en P3 predominando el de tamaño menor a 0.25 mm, y relativamente pocos son de 1.0 mm, en cambio en P8 superan los 2 mm. Ello puede indicar que en el área de P3 los ciclos humectación/secado son más bruscos que en P8, originando elementos de yeso más pequeños (Cody y Cody, 1986). Por otro lado y al igual que en P8, las inclusiones en el yeso pueden ser tanto de halita dado el alto contenido de sales, como de arcilla esmectítica. Para P3 no se tiene análisis de DR-X pero se deduce el tipo de arcilla por su color amarillento en LPP, similar al del Pedión P8, para el cual y por DR-X la arcilla corresponde a montmorillonita.

Otra diferencia con el Pedión P8 y también con P1 y P6, es que en P3 la  $CE_{es}$  y el porcentaje de sodio intercambiable son más altos. Estas dos características restringen aún más el uso de este suelo, por lo tanto el manejo del mismo debe contemplar problemas de salinidad y sodicidad. Aunque Artieda (1996) dice que en suelos yesosos es difícil hablar de sodicidad, sin embargo quizá en este caso sea necesario considerarla para el manejo del mismo.

**Deshidratación del yeso y bassanita.** El yeso contiene dos moléculas de agua en su constitución ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) la cual se empieza a perder con facilidad después de los 40 °C (Herrero, 1991; Artieda, 1996), y a partir de 70 °C se empieza a transformar en bassanita ( $CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$ ), la deshidratación se da porque una y media molécula están débilmente combinadas (Saad, 1960). Los granos de yeso de las tres láminas delgadas del pedión P3 están deshidratados. Ello pudo ocurrir durante la impregnación de la muestra o al desbastar la sección delgada sin utilizar aceite como lubricante, deshidratación del yeso inclusive cuando el desbastado se hace a mano (Artieda, Octavio, 2004, comunicación personal).

La bassanita es un mineral metaestable de tal suerte que con la presencia de agua de lluvia o humedad atmosférica se rehidrata nuevamente (Hamdi-Aissa, 2002), por ello es difícil encontrarla en la naturaleza. Sin embargo, Hamdi-Aissa (2002) reporta bassanita y dice que es debido a la deshidratación parcial del yeso en una costra de yeso poligonal en el desierto de el Sahara, Argelia; agrega que el yeso se deshidrató desde la superficie hacia al interior, y que en el subsuelo se da debido a fuerte fuerza iónica de la salmuera.

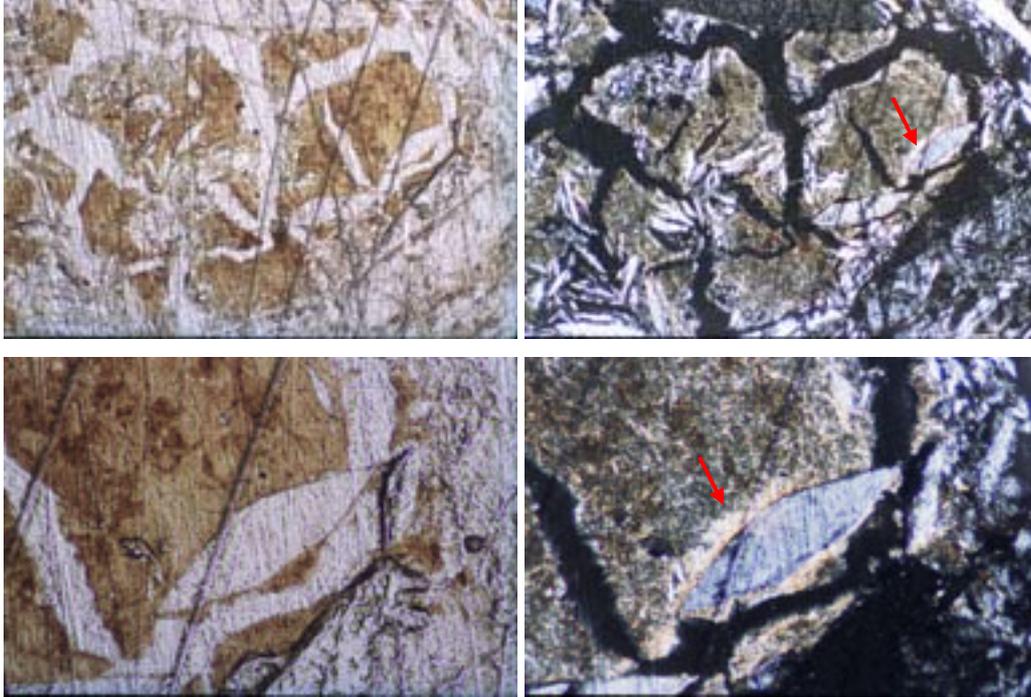
Cody y Cody (1988) produjeron bassanita a temperatura de 60 °C y 30 % de salinidad. Chen (1997) al calentar la muestra durante 48 horas a 80 °C encontró cristales microcristalinos y dice que probablemente se trate de bassanita.

La deshidratación del yeso y su transformación en bassanita la constató Artieda (1996) calentando la muestra en estufa con posterior observación al microscopio, al mineral formado lo consideró artefacto. Con base a lo anterior, los cristales birrefringentes presentes en los granos de yeso de las tres láminas delgadas del perfil P3 con severa deshidratación (Figuras IV.247, IV.248, IV.255, IV.256) y que se pudieran identificar como bassanita, en realidad son artefactos. Lo mismo pasa con algunos granos de yeso de secciones delgadas de otros pediones con características similares.

**Revestimientos y rellenos de material fino arcilloso.** Tanto en el pedión P8 como en P3 se encontraron rellenos y granos de yeso con revestimientos de arcilla. Algunas veces de aspecto límpido y color amarillento, un poco más rojizo en P3, de montmorillonita según análisis por difracción de rayos X en el pedión P8. En P3 el PSI es mayor (35.2) que en P8 (<25). El contenido de yeso es similar en los horizontes superficiales (14.2 % en P3 y 14.4 en P8). El porcentaje de CaCO<sub>3</sub> es bajo en los tres horizontes de ambos perfiles (1.5-1.2 %). Una diferencia en el horizonte superficial es que en P8 los granos de yeso están dispersos por todo el horizonte, además de la costra, en cambio en P3 se manifiesta en forma de nódulos y rellenos, con lo que su influencia en la floculación de la arcilla puede ser menor en P3.

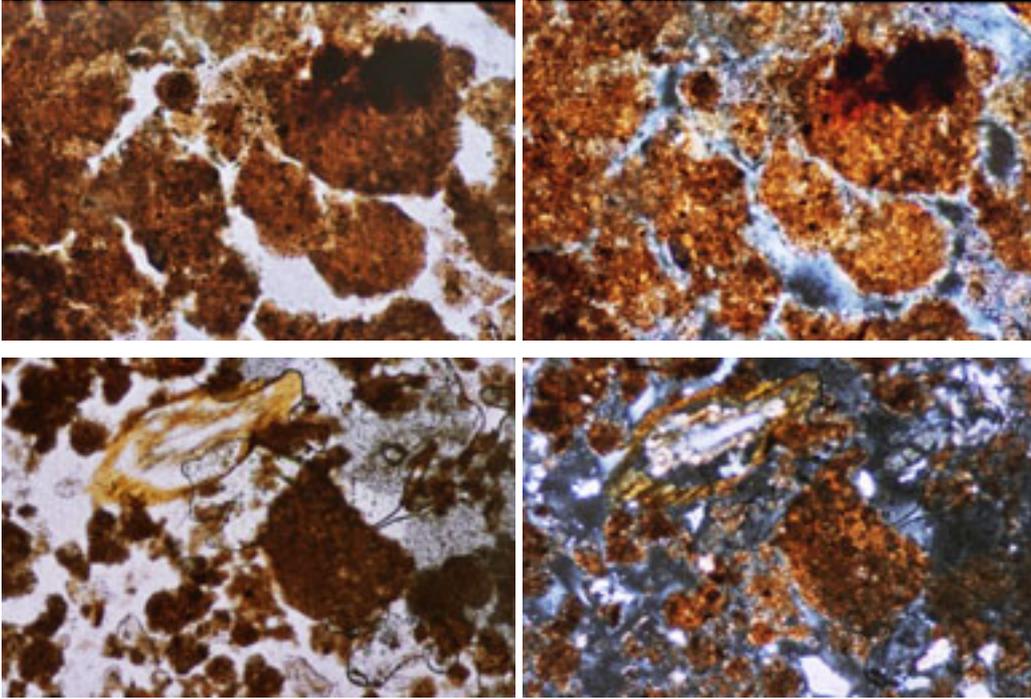
El alto contenido de sodio, bajo contenido de carbonato de calcio y yeso en forma de nódulos hacen posible la descalcificación del material arcilloso y con ello su dispersión. En la época de lluvias se inundan las áreas de los pediones, especialmente en P3, permaneciendo el agua en superficie por algunos días dependiendo de la intensidad y cantidad de agua precipitada. Bajo esas condiciones el material dispersado se halla en suspensión y penetra en el suelo a través de la porosidad conductora. Ello se constata al encontrar rellenos con material fino arcilloso en cámaras y canales con presencia de raíces (Figuras IV.259 a IV.262) y muy escasamente en fisuras. En los horizontes subsuperficiales de los perfiles P3 y P8 el material fino es muy similar al de los horizontes superficiales, el cual también está descalcificado (Figuras IV.263 a IV.266) y en horizontes subsuperficiales del pedión P3 frecuentemente en bioporos con actividad

de raíces; además, tal como se aprecia en las Figuras IV.259 a IV.262, el material fino no presenta laminación y la fábrica-b es indiferenciada, es granoestriada cuando se relaciona con los granos de yeso, o poro estriada (Figuras IV.259 a IV.262).



Figuras IV.259, LPP a IV.262, LPC. Relleno de material fino arcilloso fracturado y con fábrica-b indiferenciada y granoestriada. Lado mayor del primer par 6.8 mm y del segundo 1.09 mm.

Este material fino arcilloso una vez presente en los huecos y al estar rodeado de yeso puede originar revestimientos arcillosos como los de las figuras IV.217, IV.218, IV.253 y IV.254, los cuales pueden tener un periodo de vida corto dado el dinamismo del yeso. Sin embargo en P3 las más de las veces los granos de yeso que rodean al hueco relleno de material fino arcilloso no presentan revestimientos. Otras veces los revestimientos pueden corresponder a arcilla orientada debido a la presión ejercida al cristalizar el yeso, lo cual se aprecia en el material fino con fábrica-b granoestriada en contacto con el yeso. Stoops (2001. p56) señala que en suelos inundados con agua conteniendo material fino en suspensión se originan “revestimientos de inundación” (*flood coatings*), agrega que revisten la porosidad conductora más grande y consisten en arcilla gruesa débilmente orientada, estos revestimientos se formaron en corto tiempo y se destruyen rápidamente.



Figuras IV.263, LPP a IV.266, LPC. Material fino descalcificado a diferente profundidad, por su similitud al material fino del pedión P8 es posible que sea montmorillonita. El primer par de Figuras corresponde a los 5 cm superiores, y el segundo se muestreó a 30-35 cm del tercer horizonte y es parte de un bioporo con raíz y con relleno suelto completo. Lado mayor del primer par 0.55 mm y del segundo 1.09 mm.

**5.3.2. Suelos en planicie con horizonte yesoso profundo.** En esta geoforma se ubican los pediones P2 y P5, aunque el representativo es el segundo. El primero se incluyó junto con el P5 por la profundidad a la que aparece el horizonte yesoso, sin embargo se tienen diferencias tanto por la profundidad a la que aparece (55 y 80 cm, respectivamente) como por sus características (horizonte petrogypico y gypico, respectivamente). Por ello en la discusión o interpretación se hará énfasis en los dos perfiles. Ambos se ubican en la Zona Media, el primero a 3.5 km al suroeste de San Bartolo, Rioverde, y el segundo a 2 km al noreste de San Isidro, Villa Juárez.

### Perfil P2.

#### P2.A. Clasificación y características del sitio

Soil Survey Staff, 1999: Petrogypsids cálcico, limoso grueso, mezclado, superactivo, térmico.

WRB, 1999: Gipsisol endopétrico, sódico, hiposálico, cálcico.

Uso: Apacentamiento de ganado menor y mayor, muy explotado. Hormiguero activo con detritus (abono).

Relieve: Plano con ligeras ondulaciones.

Flora: Matorral desértico; *Ephedra* sp, *Larrea tridentata*, *Prosopis laevigata*.

Erosión: Laminar y en cárcavas.



A

Akzn

2Ym

Figuras IV. 267 y IV.268. Sitio y perfil P2. Matorral desértico de gobernadora (*Larrea tridentata*), azulillo (*Ephedra* sp.) y mezquite (*Prosopis laevigata*).

**P2.B. Descripción macromorfológica.**

Az. Profundidad 0 – 30 cm. Seco. Color en seco 10YR 7/3 y en húmedo 10YR 4/2.

Franco. Consistencia en seco muy duro y en saturado o muy húmedo ligeramente plástico y ligeramente pegajoso. Estructura bloques subangulares tendiendo a granular bien desarrollados, tamaño medio, más o menos de 1 cm de grosor. Raíces finas muy pocas y gruesas pocas. Poros medios comunes y finos muchos. Violenta reacción al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Permeabilidad moderada. Con buen drenaje. Sin indicios de fauna. Transición abrupta o marcada y límite ligeramente ondulado.

Bwkzn. Profundidad 30 – 55 cm. Seco. Color en seco 10YR 8/2 y en húmedo 10YR 7/3.

Franco. Consistencia en seco blando y en saturado ligeramente pegajoso y ligeramente plástico. Estructura bloques subangulares tendiendo a granular medianamente desarrollados, tamaño medio, alrededor de 1.5 cm. Raíces finas pocas. Poros canales comunes y muy finos muchos. Violenta reacción al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Permeabilidad moderada y con buen drenaje. Sin presencia de actividad de fauna. Transición marcada o abrupta y límite ligeramente ondulado.

R(Ym). Profundidad mayor a 55 cm. Seco. Violenta reacción al HCl al 10 %. Estructura laminar. Extremadamente duro. Presencia de raíces. Presencia de cristales que brillan al sol, correspondiendo a material yesoso muy similar, en cuanto a composición, al del último horizonte del perfil P1 (apartado 5.3.2).

Tabla IV.16. Resultados de los análisis físicos, químicos y mineralógicos, Pedión P2.

Profundidad cm	Horizonte	Tamaño de partículas, %			pH H <sub>2</sub> O 1:2.5	MO %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/kg suelo	CEes dS/m 25 °C	Cationes solubles mmol/l extracto				RAS
		Ar	L	Ac					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
		0-30	A	5.2					69.2	25.6	8.3	1.1	
30-55	Akzn	5.0	78.0	17.0	8.0	2.9	305	14.0	19.8	15.0	0.1	39.9	9.3
>55	2Ym	No se muestreó, horizonte yesoso, con cristales iguales al último horizonte del perfil P1											

Continuación de la Tabla IV.16.

Profundidad Cm	Horizonte	CaCO <sub>3</sub> Total %	Yeso %	CIC cmol/kg suelo	Cationes intercambiables, cmol/kg suelo				PSI	Da g/cc
					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>		
0-30	A	19.0	2.0	22.0	10.5	5.2	6.0	0.3	1.7	NE
30-55	Akzn	37.0	2.4	24.3	12.2	7.0	0.4	4.7	19.3	1.16
<b>Mineralogía, en orden decreciente de concentración relativa, DR-X</b>										
0-30	A	Calcita, cuarzo, feldespato, esmectita (posible nontronita‡)								
30-55	Akzn	Calcita, cuarzo, esmectita‡, feldespato‡								

‡ Mineral en muy baja proporción en relación al resto de los minerales.

## P2.C. Descripción micromorfológica.

**P2.C.1. Microestructura.** El primer horizonte tiene fuerte pedialidad. La estructura corresponde a agregados de diverso tamaño, los mas grandes son porosos de 0.5 a 2.3 mm de tamaño, alterados y traslocados por la mesofauna, principalmente lombrices. Otro grupo de agregados (60 %) son esferoidales con tamaño desde 0.06 a 0.5 mm, no porosos, subredondeados y redondeados lisos, no acomodados, localizados en cámaras y canales, son frecuentes los correspondientes a excretas. La estructura es granular-porosa (granular-migajosa) compleja con cámaras y canales.

La pedialidad del segundo horizonte también está bien desarrollada con predominio (>60 %, 0.02 - 2.5 mm) de los agregados esferoidales subredondeados y redondeados lisos sin acomodar, son más comunes los de menor tamaño. Los agregados más grandes son ovalados, algunos con bandas arcillosas intra-agregados amarillos, deformados y/o fracturados, fábrica-b cristalítica microesparítica o estriada. También hay bloques subangulares parcialmente acomodados y más alterados que los del primer horizonte, con tamaño de 0.5 a 2.5 mm y muy pocos de hasta 1.1 cm. La estructura es granular-porosa compleja con cámaras y canales.

**P2C.2. Huecos.** La lámina del primer horizonte tiene porosidad del 40 %. Un 16 % corresponde a cámaras con tamaño ≤ 12 mm, con paredes lisas a onduladas. Los huecos de empaquetamiento compuesto constituyen un 12 % y su tamaño va de 30 a 450 μm. Los canales constituyen el 8 % con tamaño de 0.04 a 1.0 cm. Las fisuras conforman el 4 % con tamaño desde menos de 25 a 80 μm, las más delgadas son intra-agregados. Muy escasas vesículas son intra-agregados.

En la segunda lámina correspondiente al segundo horizonte la porosidad es semejante a la del primero, nuevamente predominan las cámaras (16 %), con tamaño 0.6 a 1.4 cm, de paredes lisas a onduladas. Los huecos de empaquetamiento compuesto (12 %, 0.12 a 0.4 mm); los canales constituyen el 8 % y su tamaño varía de 0.4 a 7.0 mm, de paredes lisas; el 4 % corresponde a fisuras de paredes lisas y tamaño desde menos de 0.02 a 0.3 mm.

**P2C.3. Componentes orgánicos.** En el primer horizonte consisten principalmente de raíces (2 %) de color marrón oscuro a amarillo, algunas de ellas sin flobafenizar. Existen numerosos pelos radiculares birrefringentes, frecuentemente rodeando a los agregados y muchos de ellos calcificados (Figuras IV.269 y IV.270). Restos orgánicos anhistos ovalados de color pardo rojizo en LPP, birrefringentes, algunos menores a 20  $\mu\text{m}$  y sin birrefringencia. Otros son componentes orgánicos anhistos amarillos tanto en luz plana como en nícoles cruzados, birrefringentes, alargados (0.05 – 0.1 mm), posiblemente sean restos de paja traslocados. Son raros (0.4 %) los restos de ostrácodos con tamaño de 65 a 450  $\mu\text{m}$ , birrefringentes, bandeados. También hay restos de paja de color amarillo y birrefringentes (Figuras IV.271 y IV.272), de 1.3 mm de diámetro y con material basal en su interior.

En el segundo horizonte disminuye la actividad de las raíces a menos del 1 % y la mayoría está flobafenizadas. Sin embargo se incrementa el porcentaje (2 %) y tamaño (0.1x0.45 mm a 1.9x4.3 mm) de los ostrácodos, siendo de forma angular o curvada, con bandas birrefringentes. Son raros los componentes orgánicos anhistos.

#### **P2C.4. Masa basal**

**P2C.4.1. Material grueso, >20  $\mu\text{m}$ .** En el primer horizonte la relación grueso/fino es de 1.5/8.5. El principal mineral es calcita (8 %) de tamaño menor o igual a 150  $\mu\text{m}$ , algunos con revestimientos de microesparita. Le sigue en importancia el cuarzo (6 %) con tamaño que varía de 20 a 125  $\mu\text{m}$ , poco alterados, algunos granos de cuarzo son policristalinos. La biotita es rara (1 %, 40  $\mu\text{m}$ ). Hay elementos aislados de plagioclasa de 60-200  $\mu\text{m}$  y dos cristales de feldespato grandes (0.4 a 1.4 mm) muy alterados linealmente, los restos del elemento más grande presentan colores de interferencia de tercer orden (Figuras IV.273 a IV.276), los más pequeños son de color gris tenue a gris

muy oscuro. Hay restos orgánicos anhistos, rojos, ovalados, birrefringentes, aproximadamente de 40  $\mu\text{m}$  de diámetro. Asimismo hay algunos elementos aislados de olivino de 35  $\mu\text{m}$  de diámetro, con alteración linear irregular. La distribución relativa g/f es porfírica abierta.

En el segundo horizonte la relación grueso/fino es de 1.5/8.5 y se tiene calcita (9 %,  $\leq$  0.25 mm) y cuarzo (5 %, 65  $\mu\text{m}$ ), este último también se presenta en forma cristales policristalinos. El 2 % lo constituye cristales de plagioclasa y de ortoclasa (40  $\mu\text{m}$ ); de olivino birrefringente y pleocroico (50  $\mu\text{m}$ ); de moscovita; de componentes orgánicos anhistos rojos, birrefringentes en LPP y LPC, y de fragmentos líticos posiblemente de granito. La distribución relativa g/f es porfírica abierta.

**P2C.4.2. Material fino.** En los dos horizontes el material fino es punteado de color pardo amarillento en LPP y grisáceo en LPC, siendo más amarillo en el primer horizonte y más gris en el segundo. Se compone de microesparita y limo-arcillosa; con fábrica-b microesparítica.

#### **P2C.5. Edaforrasgos.**

**P2C.5.1. Revestimientos.** Son raros los revestimientos típicos de materia orgánica sobre agregados, minerales, o en rellenos en los que pueden adquirir forma concéntrica y que se describen como nódulos impregnativos (Figuras IV.277 y IV.278). En los dos horizontes, con más abundancia en el segundo, hay hiporrevestimientos de empobrecimiento o áreas de descalcificación con fábrica estriada, y relacionados a fisuras o a raíces (Figuras IV.279 a IV.281), presentes en agregados e inclusive en el interior de nódulos carbonáticos. El principal revestimiento lo constituye la microesparita en forma típica o como hiporrevestimiento sobre agregados, nódulos, y en minerales. También hay hiporrevestimientos limo-carbonáticos en cámaras y canales.

Ocasionalmente hay revestimientos rodeando a agregados, y corresponden a pelos radiculares calcificados (Figuras IV.282 y IV.283). En ambos horizontes son raros los revestimientos típicos posiblemente de manganeso sobre agregados.

**P2C.5.2. Rellenos.** Los rellenos existentes se presentan en cámaras y en canales, son rellenos del tipo sueltos continuos o discontinuos, integrados por agregados esféricos subredondeados lisos constituidos por masa basal u organo-minerales, en forma mamilada o redondos (0.2 – 0.7 mm), correspondiendo a excrementos. Hay rellenos sueltos discontinuos de microesparita y relacionados a zonas con o sin descalcificación. Hay rellenos densos incompletos correspondientes a restos orgánicos calcificados (Figuras IV.282 y IV.283). Son muy raros los rellenos subredondeados (4 mm de diámetro), de constitución organo-mineral, y con revestimientos concéntricos de materia orgánica (Figuras IV.277y IV.278).

**P2C.5.3 Nódulos.** En el primer horizonte hay nódulos órticos subredondeados lisos, pardos, fragmentados, de hasta 2 mm de grosor. Los gruesos con fábrica porfirica abierta y el material fino micrítico, con hiporrevestimiento de empobrecimiento y fábrica grano estriada.

Algunos nódulos son anórticos de color pardo oscuro o gris, de forma subredondeada y lisos, con revestimientos típicos de micrita, fábrica interna indiferenciada, y composición limo-carbonático. Hay un clasto anórtico (1x2.5 mm) constituido por calcita y esferulitas dispuestas en nódulos geódicos (Figuras IV.284 a IV.287), con revestimientos de materia orgánica. Son raros los nódulos típicos anórtico (0.2 - 0.3 mm) de color gris y forma ovalada, con fábrica-b interna cristalítica microesparítica, con revestimientos típicos de micrita. Son escasos los nódulos anórticos típicos esparíticos, de 1.3 mm de diámetro, redondeados lisos, con revestimientos de empobrecimiento, (Figuras IV.288) fábrica-b interna granoestriada.

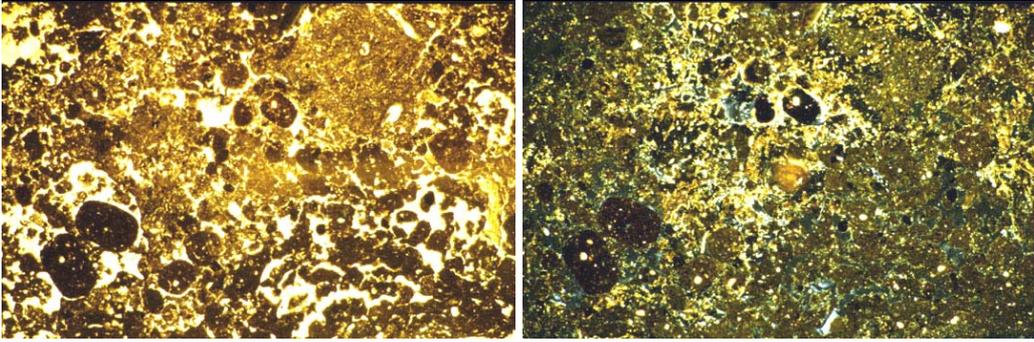
Son escasos los litoclastos anórticos conformados por varios tipos de cristales (ortoclasa, calcita, etc.) de 1.2 mm de diámetro o menor. Escasos nódulos órticos de leve a fuertemente impregnativos, típicos o dendríticos (0.05 – 0.3 mm) pardo rojizo a muy oscuros, no birrefringentes. Dentro de cámaras se tienen nódulos (5 mm de diámetro), orgánico minerales, con revestimientos de materia orgánica; también tiene esferulitas de tamaño menor a 50 µm con revestimiento de materia orgánica que dificulta distinguir la estructura radial (Figuras IV.288).

En el segundo horizonte hay un litoclasto anórtico (1.0 - 1.5 mm) de forma ovalada, birrefringente, con diversidad en sus componentes gruesos (cuarzo policristalino, granito, calcita, Figuras IV.289 y IV.290) y sin material fino. Hay un nódulo disórtico, ovalado esparítico, de tamaño 1.3x3 mm, con fábrica grano estriada y cristalítica micrítica. Los nódulos impregnativos son muy escasos, y raros los moderadamente impregnativos, órticos desunidos, con tamaño de 1.5 mm.

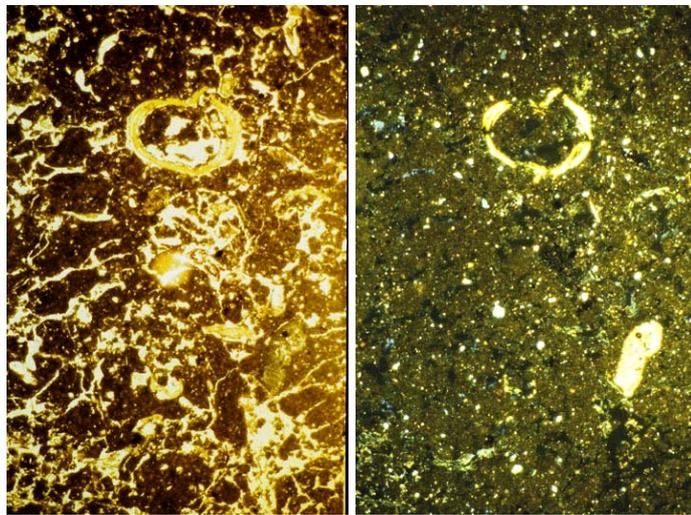
Hay un nódulo impregnativo débil, típico de 0.5 mm de diámetro (sobrepuesto a un nódulo carbonático anórtico, típico, de 2 mm de diámetro), con cuarzo, calcita y esferulitas, con fábrica interna cristalítica microesparítica. Hay un nódulo esparítico de 2.3 mm de diámetro, subangular liso, anórtico, con revestimientos de microesparita, fábrica cristalítica microesparítica y estriada. También hay nódulos medianamente impregnativos concéntricos debidos a materia orgánica.

**P2C.6. Excrementos.** . En el primer horizonte hay excrementos esféricos (posiblemente de larvas de *Adelidae* o *Bibionidae*), de color pardo amarillento, tamaño de 0.5 mm. Otros muy frecuentes son de 0.5 a 2 mm de grosor y de forma similar a basilo-cilíndrica, de color pardo amarillento con fábrica cristalítica y pueden corresponder a larvas de *Tipulidae* o *Lymnofilidae*. También hay frecuentes excrementos de oribátidos, bien conservados, algunos parcialmente descalcificados. También son frecuentes los excrementos mamilados correspondientes a lombrices (Figuras IV.291 y IV.292).

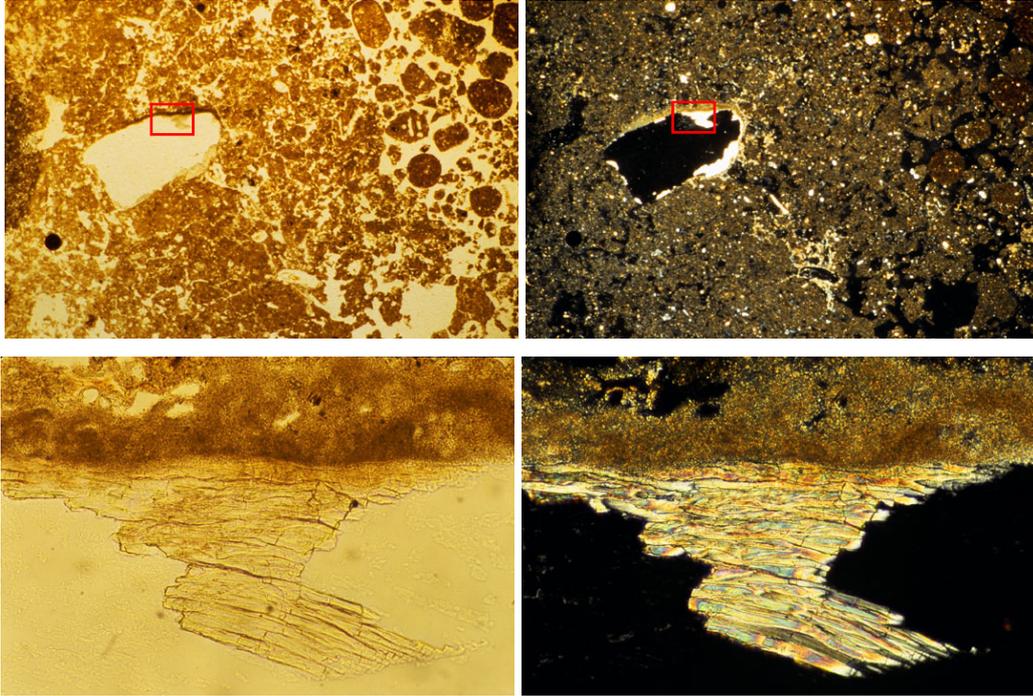
En el segundo horizonte disminuye la presencia de oribátidos, y los excrementos ovalados son de 0.02 a 0.04 mm de diámetro, de color pardo rojizo. Son frecuentes las deyecciones mamiladas de 150 µm correspondiendo a lombrices, y al igual que las del primer horizonte están constituidas de masa basal; estas excretas también se pueden describir como edaforrasgo de fábrica. Otros excrementos son esféricos, cuyo tamaño varía de 0.5-0.8 mm posiblemente de larvas de *Adelidae* o *Babionidae*, y algunos son basilo-cilíndricos de 40 µm correspondientes a lombrices o *Echytraeida*.



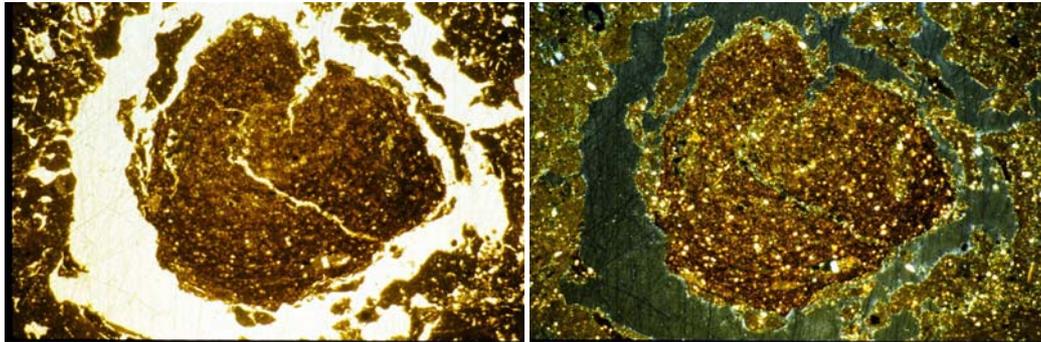
Figuras IV.269, LPP y IV.270, LPC. Excrementos de larvas posiblemente de *Tupiledae* y *Lymnofilidae*. Pelos radiculares calcificados. Lado mayor 6.8 mm.



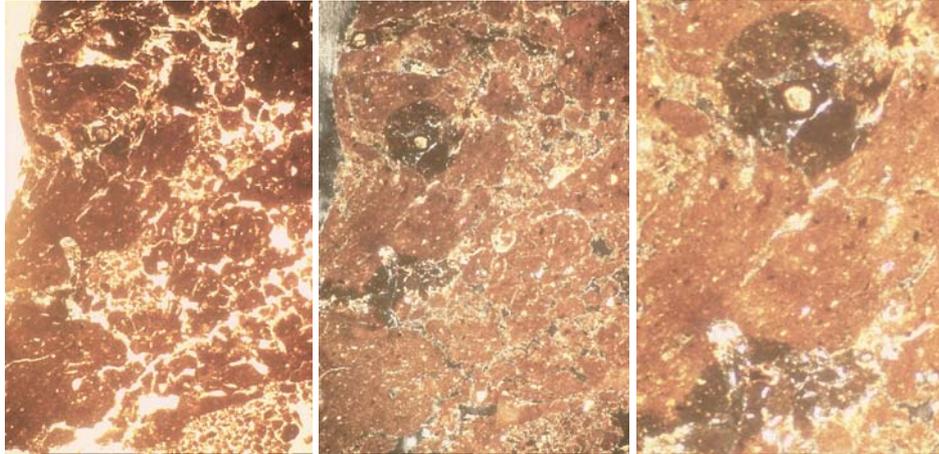
Figuras IV.271, LPP y IV.272, LPC. Corte transversal de paja relleno de masa basal. Nódulo disórtico de esparita. Lado menor 4.48 mm.



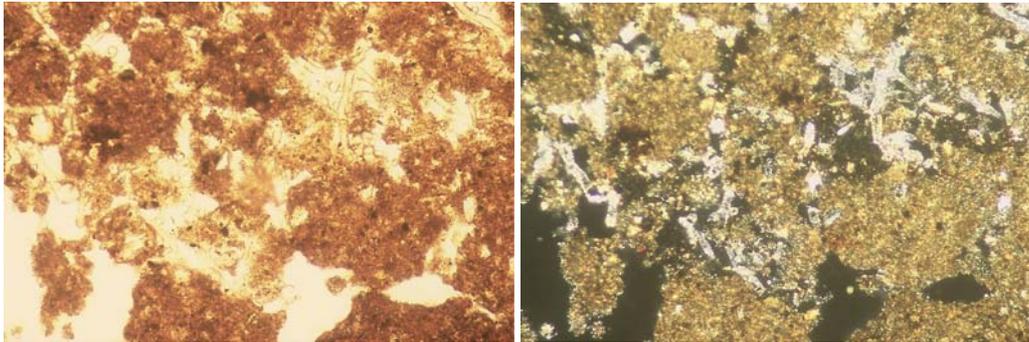
Figuras IV.273, LPP a IV.276, LPC. Restos de feldespatos. Lado mayor del primer par de Figuras 6.8 mm y del segundo 0.4 mm.



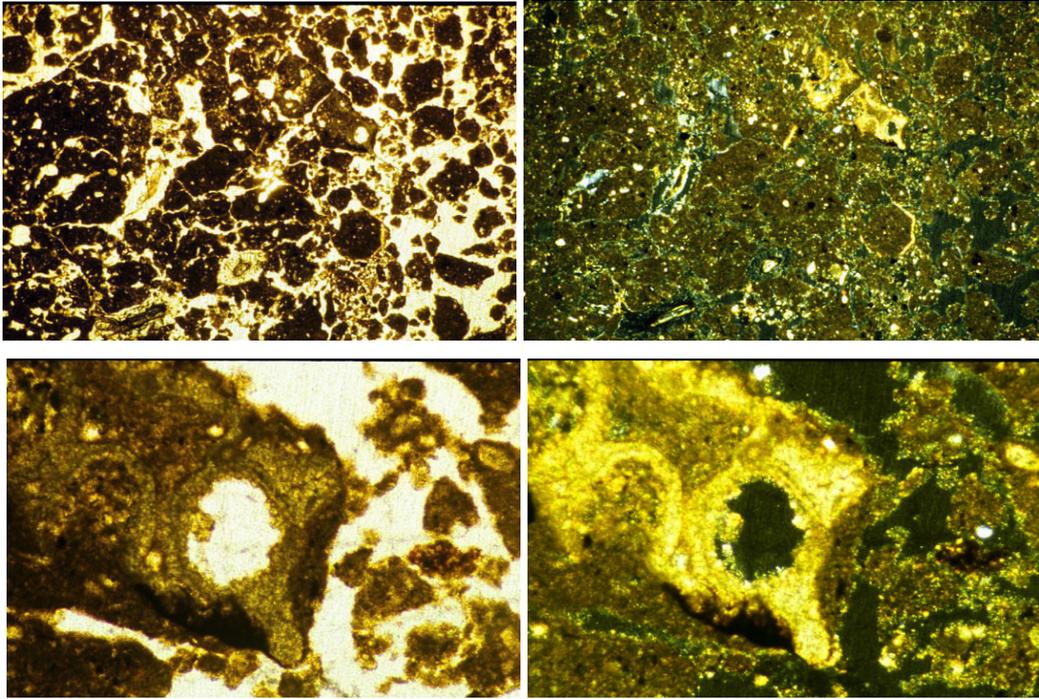
Figuras IV.277, LPP y IV.278, LPC. Relleno organo-mineral fragmentado y con revestimientos impregnativos concéntricos. Lado mayor 6.8 mm.



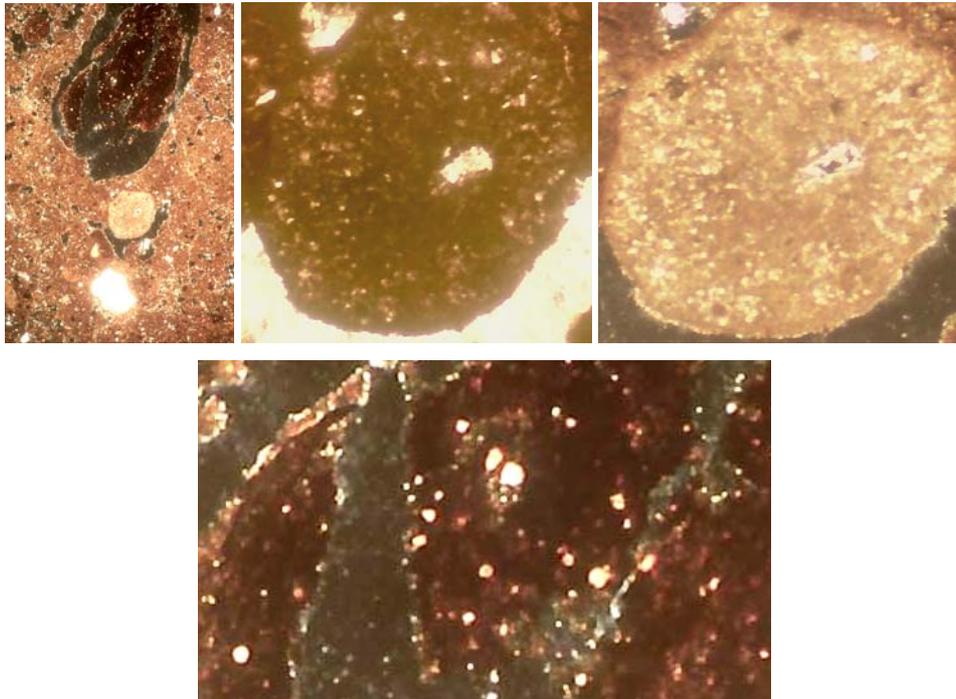
Figuras IV.279, LPP a IV.281, LPC. Hiporrevestimientos de empobrecimiento o descalcificación alrededor de raíz y en una fisura y canal. Lado menor de la primera 4.5 y de las segundas 2.246 mm.



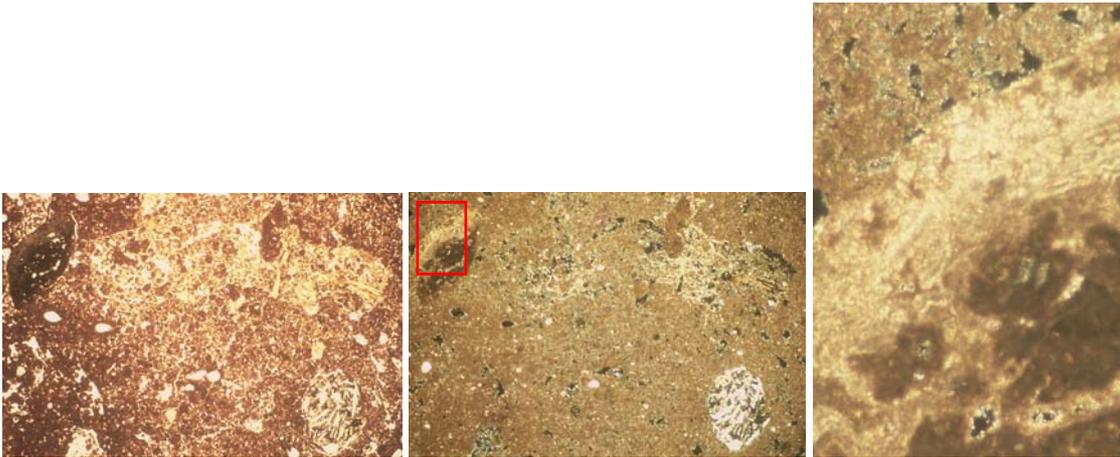
Figuras IV.282, LPP y IV.283, LPC. Pelos radiculares calcificados y otros están activos indicado por su aspecto brillante en LPC y transparente en LPP, y no tener los colores típicos de la calcita. Lado mayor 1.1 mm.



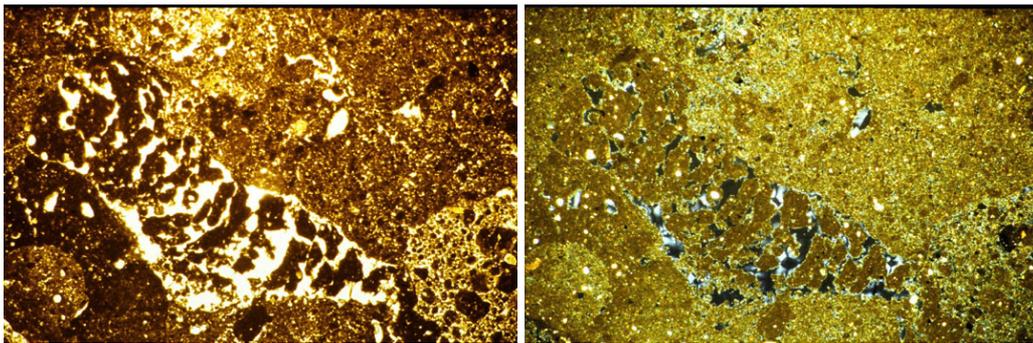
Figuras IV.284, LPP a IV.287, LPC. Clasto sedimentario con nódulos geódicos y otros con relleno de material basal y revestimientos carbonáticos. Lado mayor del primer par de Figuras 6.8 mm y del segundo 1.09 mm.



Figuras IV.288. Nódulo esparítico con hiporrevestimientos de empobrecimiento, cristales de cuarzo y ortoclasa. Nódulo-agregado organo-mineral desunido, con calcita, cuarzo y esferulitas. Los revestimientos de materia orgánica no permiten apreciar la estructura radial de las esferulitas. Fábrica-b del material fino micrita. Lado menor de la primera Figura 2.3 mm, las demás son acercamientos.



Figuras IV.289, LPP y IV.290, LPC. Profundidad 30-40 cm. En el extremo superior izquierdo hay un nódulo anórtico microesparítico con algunos cristales de esparita, acercamiento. En la parte inferior derecha se tiene un litoclasto. Son frecuentes los pelos radiculares con o sin calcificación. Lado mayor 6.8 mm.



Figuras IV.291, LPP y IV.292, LPC. Pasaje de fauna con excrementos correspondientes a lombrices. Fábrica b del material fino calcita micrítica. Lado mayor de 6.8 mm.

**Perfil P5.**

**P5A. Clasificación y características del sitio.**

Soil Survey Staff, 1999: Haplogypsis típico, limoso grueso, mezclado, superactivo, térmico.

WRB, 1999: Kastanozem gípsico, calcárico, síltico.

Uso: Agricultura de regadío.

Relieve: Plano con ondulaciones centimétricas, pendiente menor al 2%.

Flora: Cultivo anterior maíz (*Zea mays* L), chile cerrano, de puya o de árbol (*Capsicum* spp). Vegetación natural mezquite (*Prosopis laevigata*), maguey (*Agave* sp), nopal (*Opuntia* sp.)

Erosión: Moderada laminar y en cárcavas.



Figuras IV.293 y IV.294. Sitio y perfil P5. Planta de mezquite (*Prosopis laevigata*) y al fondo la sierra de Guaxcamá.

**P5B. Descripción macromorfológica.**

Ap. Profundidad 0 – 20 cm. Ligeramente húmedo. Franco arcilloso. Color en seco 10YR 3/1 y en húmedo 10YR 2/1. Consistencia en húmedo friable y en saturado pegajoso y ligeramente plástico. Estructura granular tendiendo a bloques subangulares (4 cm) fuertemente desarrollada. Raíces medias raras y finas pocas. Poros canales. Reacción violenta al HCl al 10 % y moderada al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Buena permeabilidad y buen drenaje. Sin piedras. Poros raíz rellenos del mismo suelo por acción de

microorganismos. Grietas aproximadamente de 3 cm de diámetro y 20 cm de profundidad. Transición tenue o difusa y horizontal.

Ay. Profundidad 20 – 50 cm. Húmedo. Color en seco 10YR 3/2 y en húmedo 10YR 2/1.

Franco arcilloso. Consistencia en húmedo friable y en saturado muy pegajoso y ligeramente friable. Estructura prismática con tendencia a bloques angulares bien desarrollados. Raíces finas raras. Poros canales y fisuras. Reacción violenta al HCl al 10 % y ligera al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6%. Buena permeabilidad y buen drenaje. Poros rellenos. Presenta caras de fricción muy aleatorias, nódulos (10 – 16 %) en la matriz o en canales de raíces o grietas de 1 mm de diámetro y 4 mm de largo sin reacción al HCl al 10 %, corresponde a yeso vermiforme. Transición tenue o difusa y horizontal.

Aby. Profundidad 50 – 80 cm. Húmedo. Color en seco 10YR 5/1 y en húmedo 10YR 2/1.

Arcilla. Consistencia en húmedo friable y en saturado muy pegajoso y plástico. Estructura prismática tendiendo a bloques bien desarrollados. Sin raíces. Poros canales, finos pocos. Reacción violenta al HCl al 10 % y ligera al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %. Buen drenaje y buena permeabilidad. Presenta caras de fricción, nódulos más grandes que los de la capa anterior (aproximadamente de 1.0 – 1.5 cm de largo) sobre las caras de agregados amiboidales y de color 10YR 6.5/3 en húmedo, sin efervescencia al HCl al 10 %, corresponde a yeso vermiforme. Transición tenue o difusa y horizontal.

2Y1. Profundidad 80 – 90 cm. Húmedo. Color seco 10YR 6/2 y en húmedo 10YR 5.5/3.

Arcilla con arena. Consistencia en húmedo friable y en saturado pegajoso y plástico. Estructura laminar ondulada. Sin raíces. Reacción violenta al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %, corresponde a yeso vermiforme. Buena permeabilidad y buen drenaje. Transición clara y ondulada con lengüetas.

2Y2. Profundidad 90 – 110 cm. Húmedo. Color en húmedo 10YR 8/2. Arcillo arenoso.

Consistencia en húmedo friable y en saturado ligeramente pegajoso y ligeramente plástico. Estructura laminar tendiendo a bloques subangulares débiles. Sin raíces. Violenta reacción al HCl al 10 % y sin reacción al H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6 %.

Tabla IV.17. Resultados de los análisis físicos, químicos y mineralógicos, Pedión P5.

Profundidad cm	Horizonte	Tamaño de partículas, %			pH H <sub>2</sub> O 1:2.5	MO %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> mg/kg suelo	CEes dS/m 25 °C	Cationes solubles mmol <sub>e</sub> /l extracto				RAS
		Ar	L	Ac					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	
0-20	Ap	2.0	56.0	42.0	7.8	2.9	288	2.7	19.0	10.0	6.3	2.8	0.8
20-50	Ay	1.0	87.0	12.0	7.8	3.9	265	2.5	15.0	8.5	0.4	3.5	1.0
50-80	Aby	1.2	90.8	8.0	7.9	2.0	254	2.9	16.0	9.0	0.3	4.0	1.0
80-90	2Y1				8.1	3.8	248	2.7	14.0	8.0	0.3	3.8	1.1
90-110	2Y2				8.1	0.2	10	2.5	13.0	6.35	0.2	2.3	0.7

Profundidad cm	Horizonte	CaCO <sub>3</sub> Total %	Yeso %	CIC cmol <sub>e</sub> /kg suelo	Cationes intercambiables, cmol <sub>e</sub> /kg suelo				PSI	Da g/cc
					Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>		
0-20	Ap	26.0	2.5	30.0	22.1	6.0	1.40	0.50	1.7	1.30
20-50	Ay	28.0	2.7	27.0	18.75	6.5	1.30	0.45	1.7	1.15
50-80	Aby	26.5	2.9	35.0	26.60	6.5	1.20	0.70	2.0	1.10
80-90	2Y1	9.2	31.4	15.0	9.45	5.0	0.25	0.30	2.0	1.30
90-110	2Y2	9.0	32.0	13.0	9.61	3.0	0.14	0.25	1.9	1.40

**Mineralogía, en orden decreciente de concentración relativa, DR-X**

0-20	Ap	Calcita, cuarzo esmectita (montmorillonita‡), feldespato‡
50-80	Aby	Calcita, cuarzo, montmorillonita-14A, yeso‡ feldespato‡
90-110	2Y2	Yeso, calcita, cuarzo‡

‡ Mineral en muy baja proporción en relación al resto de los minerales.

**P5C. Descripción micromorfológica**

**P5C.1. Microestructura.** En la lámina de los primeros 20 cm tiene fuerte pedialidad, la estructura es granular debido al paso de los aperos de labranza, el tamaño de los agregados varía de 0.2 a 2.0 cm, todos están agrietados o conformados por agregados más pequeños, ≤ 0.3 mm. La segunda y la tercera sección delgada también tienen fuerte pedialidad y corresponde a bloques angulares acomodados.

En el cuarto horizonte la pedialidad es débil, los primeros 3 cm de la lámina delgada son de bloques subangulares menores de 2 cm, el resto de la lámina es masiva vesicular. En el quinto horizonte la estructura es masiva - laminar con algunas bandas de yeso lenticular xenomórfico. En el cuarto y quinto horizonte hay organización en islas siendo más marcada en la mitad superior de la lámina correspondiente al cuarto horizonte.

**P5C.2. Huecos.** La lámina correspondiente a los primeros 20 cm tiene porosidad del 35 % y consiste principalmente de huecos de empaquetamiento compuesto (29 %) de tamaño  $\leq 2.2$  mm; las fisuras constituyen el 5 % y su tamaño va de 0.1 a 1 mm, presentes únicamente en los agregados de tamaño 0.2 a 2.0 cm; hay algunas cámaras (1 %, 0.5 cm), todos los huecos tienen paredes onduladas y lisas. La microestructura es granular compuesta.

En la sección delgada del segundo horizonte (20-50 cm) la porosidad es del 30 %, predominan las fisuras con un 25 %, su tamaño va desde  $\leq 0.02$  a  $\leq 2.0$  mm, con mayor proporción de las mayores a 0.5 mm; los canales constituyen el 3 % con un tamaño 0.5 a 2.0 mm; por último las cavidades de tamaño 0.2 a 1.5 mm constituyen el 2 %. Todos los huecos tienen paredes lisas a ligeramente onduladas, las fisuras intra-agregados son horizontales. La microestructura es granular compuesta.

En la sección delgada del tercer horizonte (50-80 cm) la porosidad es del 25 %, y nuevamente predominan las fisuras (20 %,  $0.03 \leq a \leq 3$  mm); le siguen en importancia los canales (3 %, 0.4 – 2.0 mm); las cámaras con un 1 % ( $\leq 1.0$  mm); y por último las vesículas intra-agregados constituyen el 1 %, (0.1 - 0.8 mm). Las paredes de los huecos son lisas a onduladas.

En la sección delgada del cuarto horizonte (80 a 90 cm) la porosidad disminuye al 20 % y consiste de cavidades (6 %,  $\leq 1.5$  mm), de vesículas (5 %, 0.15-0.3 mm); de fisuras (5 %, 0.2 - 0.45 mm); de cámaras (3 %,  $\leq 2.5$  cm) y de canales (1 %, 2.5mm). Todos los huecos tienen paredes serradas debido al yeso lenticular. La microestructura corresponde a masiva con cavidades y vesículas.

En la sección delgada del quinto horizonte (90 a 110 cm) la porosidad es del 25 % y los principales huecos corresponden a vesículas (15 %, 0.2 - 1.0 mm); las cavidades constituyen el 5 % con tamaño de 0.3 a 1.4 mm; el 3 % corresponde a cámaras de tamaño  $\leq 5.0$  mm, y el 2 % a fisuras de tamaño 0.15 a 0.5 mm. Todos los huecos tienen paredes serradas debido al yeso lenticular. La microestructura corresponde a masiva-laminar con vesículas.

**P5C.3. Componentes orgánicos.** En la sección delgada del primer horizonte corresponden a escasas raíces y restos de tejido (0.15 – 0.3 mm), de color pardo amarillento en LPP, no birrefringentes y en los que se aprecia la estructura celular. También hay bioclastos carbonatados, birrefringentes (0.4 mm), correspondientes a ostrácodos. En la sección delgada del segundo horizonte las raíces son más escasas (0.09 mm). Son frecuentes los restos de ostrácodos carbonatados (100 – 400  $\mu\text{m}$ ). Otros bioclastos presentes son de color amarillo tanto en LPP como LPC, birrefringentes y dispersos o dispuestos en círculo, rellenos de masa basal, correspondientes a corte transversal de paja.

En el tercer horizonte son raros los restos de ostrácodos carbonatados, no se detecta actividad de raíces. En el cuarto y quinto horizonte no se detectaron restos orgánicos.

#### **P5C.4. Masa basal.**

**P5C.4.1. Material grueso.** En la sección delgada del primer horizonte la relación grueso/fino es de 1.5/8.5. Predomina la esparita (7 %, 45  $\mu\text{m}$ ); el 3 % son minerales máficos menores a 35  $\mu\text{m}$ ; el 2 % es calcita de 25  $\mu\text{m}$  de tamaño: el 2 % es yeso lenticular ( $\leq 40 \mu\text{m}$ ) o cola de golondrina (0.3 mm), sin alterar a muy alterado, con acreciones y líneas de polvo perpendiculares al eje mayor, y bordes ondulados (Figuras IV.295 y IV.296). Algunos cristales de yeso inmersos en la matriz. El cuarzo de tamaño 20-80  $\mu\text{m}$  constituye el 1 %; son raros los cristales de piroxeno ( $< 30 \mu\text{m}$ ); también son raros los granos de plagioclasa (35  $\mu\text{m}$ ) y los de olivino (35  $\mu\text{m}$ ). Son muy raros los fitolitos (Figuras IV.297 y IV.298). La distribución relativa g/f es porfírica abierta.

En lámina delgada del segundo horizonte la relación grueso/fino es de 1/3, predominando el yeso lenticular (12 %,  $\leq 140 \mu\text{m}$ ), equigranular con líneas de polvo transversales, presente en huecos como relleno, como nódulos o en forma aislada inmersos en la matriz, los cristales más grandes tienen acreciones. Otros minerales presentes son la esparita (6 %, 0.03-0.08 mm); los minerales máficos constituyen el 3 %, lo mismo que el cuarzo (3 %), y el 1 % es feldespato, los últimos tres minerales tienen tamaño menor a 50  $\mu\text{m}$ . La distribución relativa g/f es porfírica abierta.

En la sección delgada del tercer horizonte la relación grueso/fino es 1/3. Predomina el yeso lenticular ( $\leq 160 \mu\text{m}$ , 15 %), más del 10 % de este hábito corresponde a yeso equigranular, los más grandes tienen acreciones y líneas de polvo constituidas por calcita microesparítica (Figuras IV.299 y IV.300), el yeso lenticular presenta crecimiento desplazante (Figuras IV.301 a IV.302), la mayoría tienen revestimientos de microesparita, los cristales más grandes muestran acreciones por los costados, presentando apariencia ondulada; es frecuente encontrar cristales de yeso más pequeños con relación a las ondulaciones. También hay esparita (3 %,  $< 45\mu\text{m}$ ) mal clasificada; el 2 % es cuarzo límpido de tamaño  $\leq 45 \mu\text{m}$  y mal clasificado, con revestimientos de materia orgánica; y el olivino es raro, siendo menor a 1 %. La distribución relativa g/f es porfírica abierta.

En la sección delgada del cuarto horizonte la relación grueso/fino es 3/2. Predomina (55 %) el yeso lenticular inequigranular cuyo tamaños de 25, 50, 100 y 200  $\mu\text{m}$ , en la primera mitad de la lámina predominan los granos  $\geq 50 \mu\text{m}$  y son los que presentan más líneas de polvo o corrosión. El yeso lenticular equigranular (2 %) de aspecto blanco “perlado” se presenta en algunos nódulos. Es común que los cristales más pequeños rodeen a los más grandes, o que estén fuertemente orientados a poros o a agregados remanentes de material hospedante limo arcilloso o islas. El cuarzo (1.5 %) y la calcita (1.5 %) son escasos. La distribución relativa g/f es porfírica simple a cerrada. Presenta organización en islas.

En la sección delgada del último horizonte la relación grueso/fino es 6.5/3.5. El yeso constituye el 60 % del total del material grueso, la calcita (3 %, 40  $\mu\text{m}$ ) y el cuarzo (2 %) son escasos. Los granos de yeso son, en general, más pequeños que los del horizonte anterior, la mayoría son menores a 70  $\mu\text{m}$ , los del horizonte suprayacente alcanzan las 200  $\mu\text{m}$ . Los granos de yeso son de hábito lenticular idiomórfico a xenomórfico, el último por estar soldado en bandas horizontales, con distribución en empalizada o radial revistiendo vesículas y fisuras. Muchos elementos de yeso tienen líneas de polvo, son comunes los granos hipidiomorfos con bordes ondulados. Algunos cristales de yeso se disponen en forma de roseta o rosa del desierto (Figura IV.303). La distribución relativa g/f es porfírica cerrada a espacio doble. Presenta organización en islas.

**P5C.4.2. Material fino.** El material fino de los primeros 80 cm (tres primeros horizontes) es de color amarillento punteado en LPP y gris en LPC, se compone principalmente de microesparita. La fábrica-b es cristalítica microesparita punteada. En los otros dos horizontes (de 80 a 110 cm) se tiene organización en islas, tendiendo a desaparecer con la profundidad. Las islas son de color amarillento en LPP y gris en LPC, de naturaleza microesparítica, su fábrica-b es microesparítica punteada, y la fábrica-b del resto de los horizontes es microgípsica con microesparita.

### **P5C.5. Edaforrasgos.**

**P5C.5.1. Revestimientos.** En la sección delgada del primer horizonte son raros los revestimientos típicos de materia orgánica sobre agregados y minerales; son frecuentes los revestimientos típicos de microesparita en poros, agregados o sobre algunos cristales; son raros los revestimientos pardos muy oscuros, posiblemente de manganeso, sobre agregados. En la sección delgada del segundo horizonte son raros los revestimientos típicos de materia orgánica sobre agregados y minerales; son frecuentes los revestimientos típicos de yeso lenticular con orientación paralela a fisuras; también se incrementan los revestimientos típicos de microesparita sobre agregados, minerales y algunas raíces; son raros los hiporrevestimientos limo-carbonáticos en huecos.

En la sección delgada del tercer horizonte no se detectaron revestimientos típicos de materia orgánica, y los más abundantes son los revestimientos típicos e hiporrevestimientos limo-carbonáticos en huecos y en minerales o en nódulos de yeso lenticular; también hay revestimientos típicos de yeso lenticular de forma paralela a la fisura. En la sección delgada del cuarto horizonte son abundantes los revestimientos de yeso lenticular xenomórfico o hipidiomórfico en forma radial o paralela a la pared en prácticamente todos los huecos; son frecuentes los revestimientos típicos de microesparita en yeso; son raros los hiporrevestimientos de empobrecimiento de calcio en las islas de masa basal.

En la lámina delgada del quinto horizonte hay revestimientos típicos de yeso lenticular xenomórfico e hipidiomórfico en huecos; son raros los revestimientos de yeso lenticular idiomórfico e hipidiomórfico yuxtapuesto, primero es longitudinal a la pared del hueco y posteriormente es radial (Figura IV.304 y IV.305). Son raros los hiporrevestimientos de empobrecimiento en las islas de material fino.

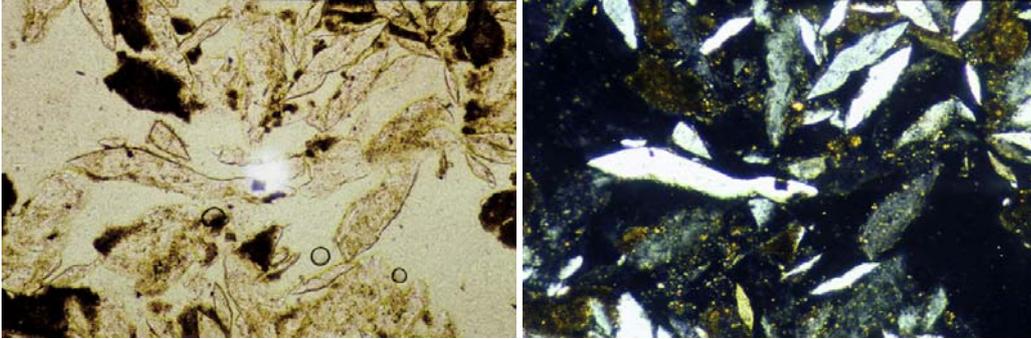
**P5C.5.2. Rellenos.** En la lámina delgada del primer horizonte son raros los rellenos densos incompletos de yeso lenticular y microcristalino. En la lámina delgada del segundo horizonte son frecuentes los rellenos densos completos o incompletos de yeso lenticular y raros los de yeso microcristalino, ambos en fisuras y con tamaño de 0.4 a 2.5 mm, algunas veces se presentan juntos. Son raros los rellenos sueltos discontinuos de masa basal en cámara de 0.9 cm y canal de lombriz de 2 mm.

En la lámina delgada del tercer horizonte son frecuentes los rellenos densos completos o incompletos de yeso lenticular con granos de mayor tamaño a los del horizonte superior; hay un relleno suelto discontinuo de agregados mamilados y naturaleza similar a la del material fino. En la lámina delgada del cuarto horizonte los rellenos (0.4 mm) son densos completos o incompletos de yeso lenticular. En la lámina delgada del quinto horizonte son frecuentes los rellenos densos completos o incompletos de tamaño 0.4 a 1.7 mm, de yeso lenticular idiomórfico o hipidiomórfico algunos de aspecto perlado, el tamaño del cristal es menor a 60  $\mu\text{m}$  y en algunos nódulos son equigranulares (Figuras IV.306 y IV.307).

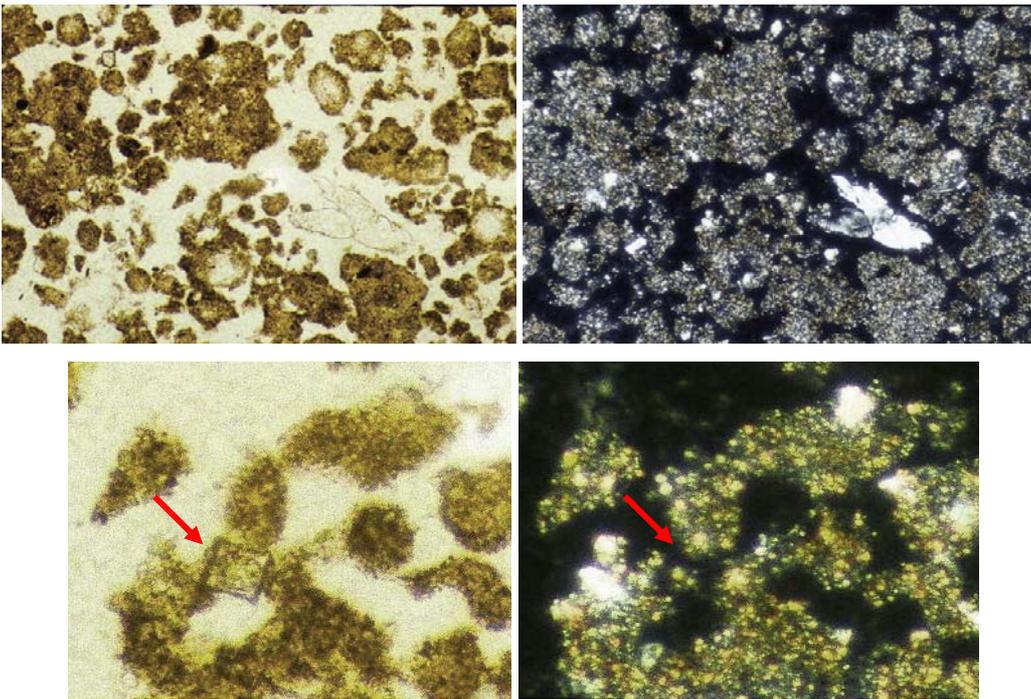
**P5C.5.3. Nódulos.** En la lámina delgada correspondiente al primer horizonte solamente se aprecian escasos nódulos típicos disórticos de yeso indentado o lenticular, tamaño 0.25 a 0.5 mm. En la lámina delgada correspondiente al segundo horizonte, son frecuentes los nódulos (300  $\mu\text{m}$ ) típicos órticos de yeso microcristalino y muy raros de yeso lenticular; hay un nódulo órtico típico limo carbonático, tamaño 0.8 mm. En la lámina delgada correspondiente al tercer horizonte son raros los nódulos órticos típicos de yeso lenticular, tamaño 0.4 mm; son frecuentes los nódulos impregnativos limo-carbonáticos, de tamaño 0.12 a 0.4 mm, sobre los agregados. En el cuarto horizonte son raros los nódulos órticos típicos de yeso indentado, tamaño 0.45 mm. En el quinto horizonte son frecuentes los nódulos órticos típicos de yeso lenticular hipidiomórfico y xenomórfico, de 0.35 mm de diámetro.

**P5C.6. Excrementos.** En el primer horizonte no se detectaron restos de actividad. En el segundo horizonte los excrementos son subredondeados y cilíndricos de color pardo oscuro, de 60  $\mu\text{m}$  de diámetro y probablemente pertenecen a larvas de *Lymnophillidae*; otras son mamiladas correspondientes a lombrices. En el tercer horizonte los

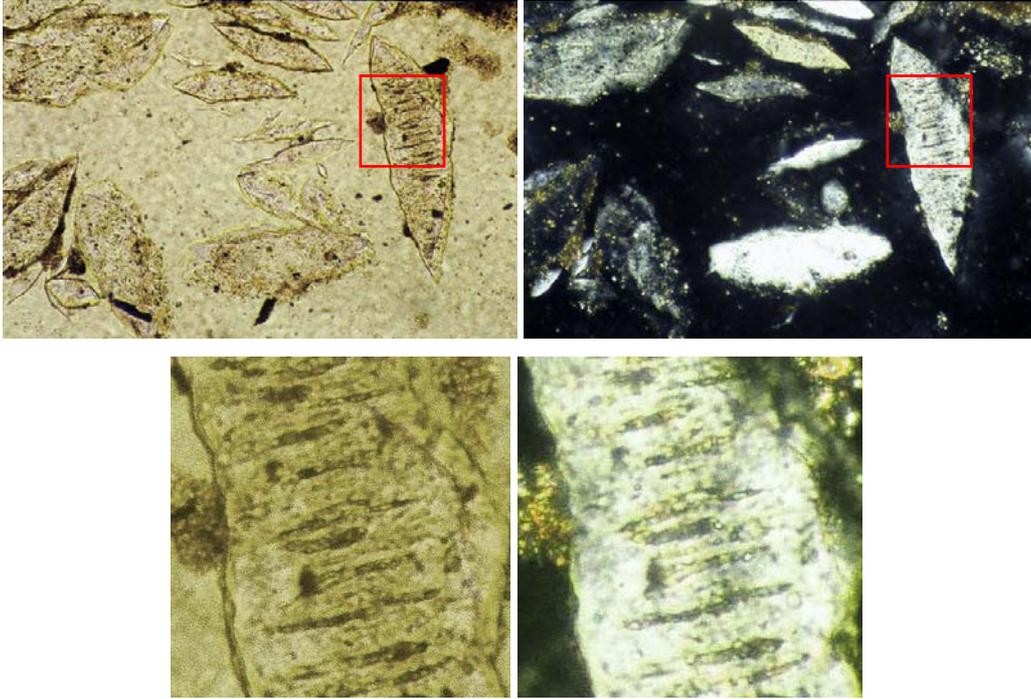
excrementos son mamilados, de color claro en LPP y pardo oscuro en LPC, con fábrica interna cristalítica micrítica punteada, corresponde a lombrices (Figuras IV.308 y IV.309). En el cuarto y quinto horizonte es muy escasa la actividad de lombrices.



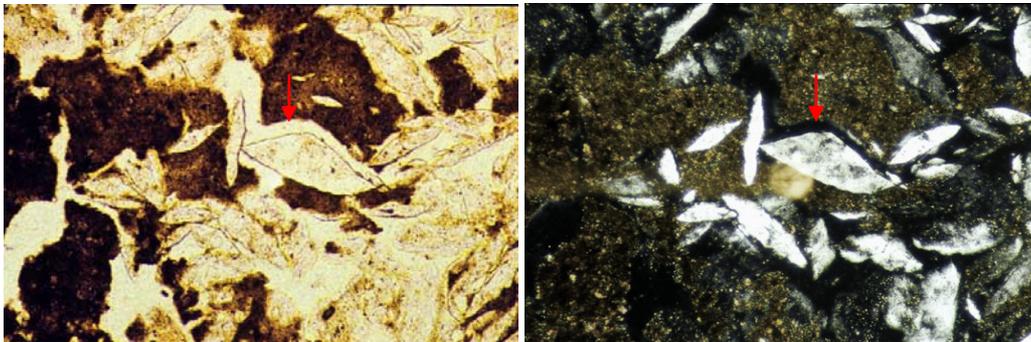
Figuras IV.295, LPP y IV.296, LPC. Yeso lenticular con bordes ondulados debido a las acreciones, con líneas y áreas de polvo. Lado mayor 1.14 mm.



Figuras IV.297, LPP y IV.298, LPC. Yeso cola de golondrina en formación o posibles desprendimientos en yeso lenticular. Fitolito con caras curvas y en el centro otro recuadro con esquinas redondeadas. Lado mayor 1.14 mm.



Figuras IV.299, LPP y IV.300, LPC. Yeso lenticular de borde sinuoso con líneas de polvo de naturaleza microesparítica y micrítica, y revestimientos limo carbonáticos. Lado mayor de las dos primeras Figuras 0.55 mm.



Figuras IV.301, LPP y IV.302, LPC. Yeso lenticular con crecimiento por presión en forma desplazante. Lado mayor 1.14 mm.

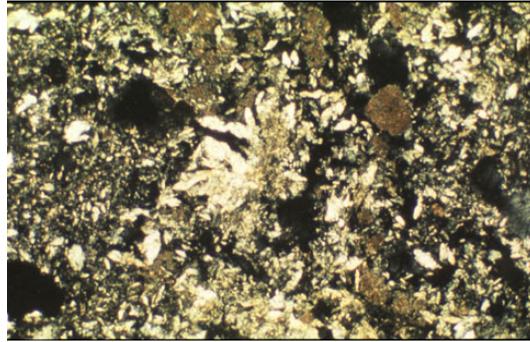
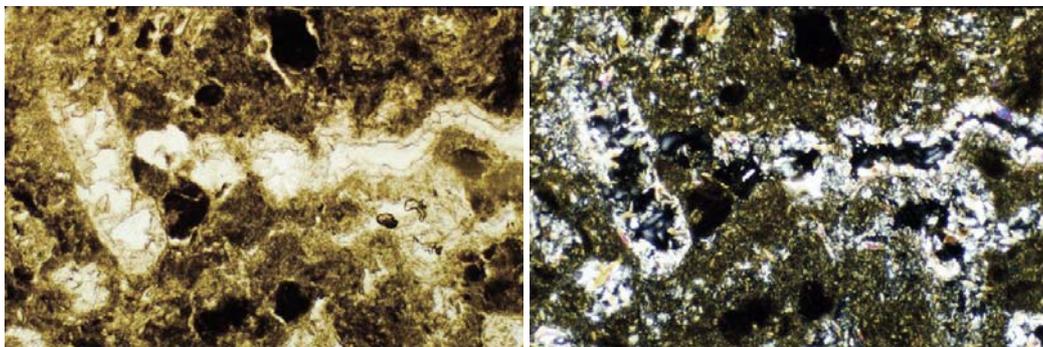
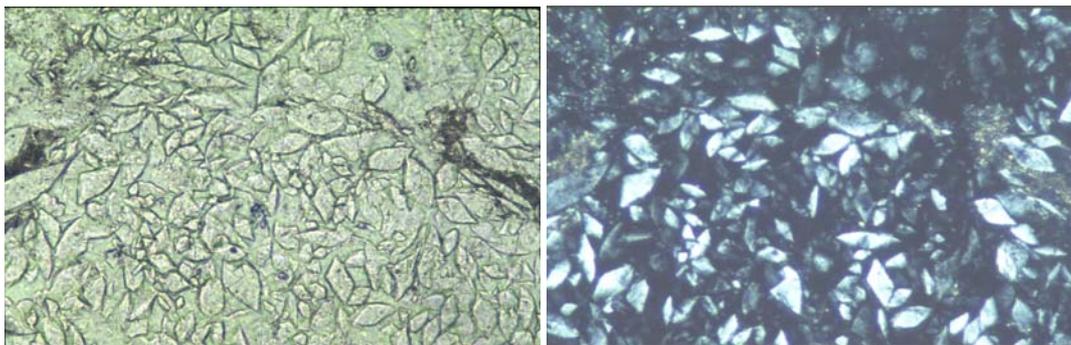


Figura IV.303, LPC. Cristales de yeso lenticular hipidiomórfico con disposición incipiente en forma de roseta o rosa del desierto. Lado mayor 3.4 mm.



Figuras IV.304, LPP y IV.305, LPC. Revestimiento yuxtapuesto, primero se tienen cristales con orientación paralela a la pared del hueco y posteriormente con orientación radial o perpendicular al hueco. Lado mayor 3.4 mm.



Figuras IV.306, LPP y IV.307, LPC. Relleno, en una cámara, denso completo de yeso lenticular de aspecto perlado por su reciente cristalización. Lado mayor 1.14 mm.



Figuras IV.308, LPP y IV.309, LPC. Relleno de yeso lenticular atravesado por un pasaje de lombriz. Micromasa con fábrica-b cristalítica micrítica. En la parte inferior hay un nódulo impregnativo limo carbonático. Lado mayor 6.83 mm.

**D. Interpretación.** Estos dos perfiles se diferencian en la estructura, en el proceso descalcificación / calcificación, actividad de fauna, presencia de horizonte petrogípsico y en el proceso de acumulación de yeso en los primeros 80 cm del pedión P5 y descrito en campo como yeso vermicular.

**Actividad de plantas y mesofauna.** El suelo del perfil P5 tiene pedialidad más desarrollada que P2. La microestructura es de bloques angulares en el primero y granular-esponjosa en el segundo. La diferencia en la estructura se puede deber a que el P5 es cultivado y el P2 no; otra posible causa es el mayor contenido de arcilla en el primer horizonte en P5 que en P2 (42 y 25.6 % respectivamente). Sin embargo en el segundo horizonte hay menos arcilla en P5 que en P2 (12 y 17 %, respectivamente). Quizás la principal razón sea la actividad de los organismos del suelo, muy intensa en P2. De la mesofauna de P2 predominan las lombrices, aunque también son importantes en P5, estos organismos en condiciones favorables pueden estar en una cantidad de 80 g/m<sup>2</sup> (FitzPatrick, 1980), y una cantidad de lombrices de 100 g/m<sup>2</sup> pueden pasar 90 toneladas de suelo por su tubo digestivo por hectárea en una año (Ford, 1984); este autor agrega que dicho suelo se ha enriquecido con Ca, Mg, K, P, etc. respecto al suelo no digerido.

La mesofauna remueve mucho suelo, modifica su estructura, mezcla el material orgánico con el mineral haciendo más estable el suelo, mejora la aireación y la fertilidad. En estos dos perfiles se aprecia su actividad en la presencia de cámaras, canales, excrementos (Figuras IV.283, IV.284, IV.298 y IV.299), así como en los

agregados deformados y con bandas de arcilla birrefringente, por la presión las arcillas se acomodan paralelamente entre ellas, tal como en los perfiles P10 y P13. Aunque estos dominios se podrían deber a agregados submicroscópicos de montmorillonita coalescentes (FitzPatrick, 1980). Según Wild (1992) las lombrices pueden excavar en profundidad produciendo galerías a 1 m o más. Lo anterior se constata para el pedión P5, en el que hay actividad de lombrices a más de 90 cm de profundidad.

Las plantas también participan en forma activa en el desarrollo del suelo, así en el perfil P2 se aprecia una gran cantidad de pelos radiculares vivos y otros calcificados (Figuras IV.261, IV.262, IV.274 y IV.275). Las raíces unen pequeños grupos de partículas favoreciendo el desarrollo de estructura granular o migajosa (FitzPatrick, 1980). Además se deduce que las áreas de descarbonatación es causa de las raíces debido a la asociación de hiporrestimientos de empobrecimiento de calcio con la raíz, a veces en forma redonda con la raíz en el centro (Figuras IV.271 a IV.273).

También existen áreas de empobrecimiento sin relación con las raíces, atribuibles al agua de lluvia. Esta descalcificación es tan frecuente que incluso los nódulos carbonáticos la presentan (Figuras IV.280). Los carbonatos se acumulan revistiendo los agregados y calcificando los pelos radiculares. En el pedión P5 solamente se presenta en los horizontes yesosos, y se manifiesta en las islas limo carbonáticas, afectándolas parcial o totalmente.

**Revestimientos arcillosos.** En secciones delgadas no se detectaron revestimientos arcillosos en ningún perfil, a pesar de ser lo suficientemente arcillosos como para que se desarrollen, y a que en los dos suelos hay esmectitas según análisis por DR-X (nontronita en P2 y montmorillonita en P5). Solamente en campo en P5 se detectaron algunas caras de deslizamiento posiblemente debidas al cambio de volumen por ciclos humedecimiento y secado. En caso de que se formen revestimientos, éstos pueden ser destruidos por los movimientos de expansión / contracción inherentes a este tipo de arcillas, por la acción de los aperos de labranza (en el horizonte superficial más arcilloso de P5), por el crecimiento de cristales de yeso, y por la actividad de los microorganismos del suelo.

El pedión P2 tiene horizonte petrogípsico a partir de los 55 cm lamentablemente no se tiene su sección delgada para conocer las características micromorfológicas del mismo. El pedión P5 no tiene horizonte petrogípsico y el gípsico se presenta a los 90 cm de profundidad. En P2 no se detectó yeso en las secciones delgadas ni por DR-X de los dos primeros horizontes. En cambio los tres horizontes superiores de P5 tienen yeso lenticular identificado por microscopía, aunque solamente se detecta por DR-X a partir del tercero. El yeso varía de idiotópico a xenotópico, al último se le encuentra como revestimientos radiales o en empalizada en vesículas y en fisuras, está parcialmente unido debido a que se intensificó el intercrecimiento en los huecos y cuando dominan en el suelo éste se compacta (Eswaran y Zi-Tong, 1991). Algunos revestimientos podrían corresponder a fisuras verticales o bioporos semejando “tubos”, estos se incrementan con la profundidad.

**Hábito del yeso y líneas de polvo.** El hábito de yeso predominante es el lenticular idiotópico y algunos con macla en cola de golondrina. Es frecuente el encontrar granos de yeso con líneas de polvo constituidas de microesparita y micrita (Figuras IV.291 y IV.292). En la literatura se reporta que las inclusiones se pueden deber a material del suelo atrapado durante el crecimiento del cristal, tales como halita, polihalita, calcita, arcilla, etc. (Stoops *et al.*, 1978; citados por Eswaran y Zi-Tong, 1991; Ortlieb y Pierre, 1981; Eswaran *et al.*, 1981; Allen, 1985; Eswaran y Zi-Tong, 1991; Poch *et al.*, 1998). Dichas inclusiones se convierten en áreas de debilidad por las que se corroe el yeso.

En suelos con agricultura de regadío (situación de P5) es característica la corrosión de los cristales de yeso (Eswaran *et al.*, 1981). Algunos granos de yeso están inmersos o intercalados en la matriz, posiblemente debido a la edafoturbación por los implementos agrícolas, por bioturbación o argiliturbación en suelos arcillosos tal como señala Stoops (2001), o por el proceso cristalización desplazante del yeso, sin descartar posible formación *in situ*. Algunos cristales de yeso muestran líneas de polvo, y posiblemente correspondan a deshidratación de la muestra durante el proceso de obtención de la lámina delgada, tal como en el perfil P3 (Apartado 5.3.3 del presente capítulo).

El proceso de disolución / recristalización es muy importante y se incrementa con la profundidad. Se manifiesta en la forma ondulada de los bordes de granos de yeso, principalmente en los más grandes, debido a las acreciones de yeso lenticular. Artieda

(1996) dice que el crecimiento *in situ* y desplazante del yeso lenticular se manifiesta en la concordancia de la pared del hueco con el cristal, lo cual supone cristalización en condiciones de presión, tal como se muestra en las Figuras IV.291 y IV.292. También hay yeso microcristalino rodeando a cristales grandes de yeso lenticular los cuales presentan corrosión muy avanzada, pudiendo representar proceso de disolución / precipitación estacional como indican Eswaran y Zi-Tong (1991). El agua de lluvia o de riego disuelve el yeso, y con la pérdida de humedad por evapotranspiración se incrementa la concentración de la solución del suelo respecto a iones sulfato y calcio precipitando yeso.

**Acumulación de yeso en los primeros 80 cm del pedión P5.** El área del pedión P5 se dedica a la agricultura de riego y de secano. Bajo riego se siembra principalmente maíz, sorgo, tomate y varias especies de chile (pimiento), cultivos forrajeros como la alfalfa (*Medicago sativa*) y el zacate o pasto búffel (*Cenchrus ciliaris*). En secano maíz y frijoles. En la actualidad el suelo está en proceso de gipsificación, apreciándose en el incremento de la cantidad y del tamaño del yeso con la profundidad. En los primeros 80 cm hay un incremento del 0.2 % de yeso con la profundidad, lo cual representa baja acumulación de yeso asociada al uso de agua sulfatada en el riego, pero puede ser importante en el futuro si se sigue utilizando para riego el agua sulfatada; sin embargo se desconoce la velocidad de acumulación del yeso. Por microscopía el incremento de yeso es más evidente y significativo. Así en el primero horizonte es 2 % ( $g/f_{20\ \mu m} 1.5/8.5$ ), en el segundo 10 % y en el tercero 15 % ( $g/f_{20\ \mu m} 1/3$ , en los últimos dos).

Además se identifica gradiente en el tamaño del yeso, incrementándose con la profundidad. Así en el primer horizonte el yeso es menor o igual a 40  $\mu m$ , en el segundo a 140  $\mu m$ , en el tercero a 160  $\mu m$ , en el cuarto a 200  $\mu m$  y en el quinto a 70  $\mu m$ . La diferencia de tamaño se puede deber a que en superficie los ciclos secado / humedecimiento son más bruscos, propiciando un crecimiento rápido del yeso favoreciendo el predominio de razón longitud/anchura más pequeño (Chadwick *et al.*, 1989; cita Jafarzadeh y Burnham, 1992), es decir a mayor velocidad de crecimiento mayor número de puntos de nucleación resultando granos más pequeños (Cody y Cody, 1986). En el primer horizonte al microscopio solamente se encontraron muy pocos nódulos de yeso. En el segundo horizonte son comunes los rellenos densos completos o

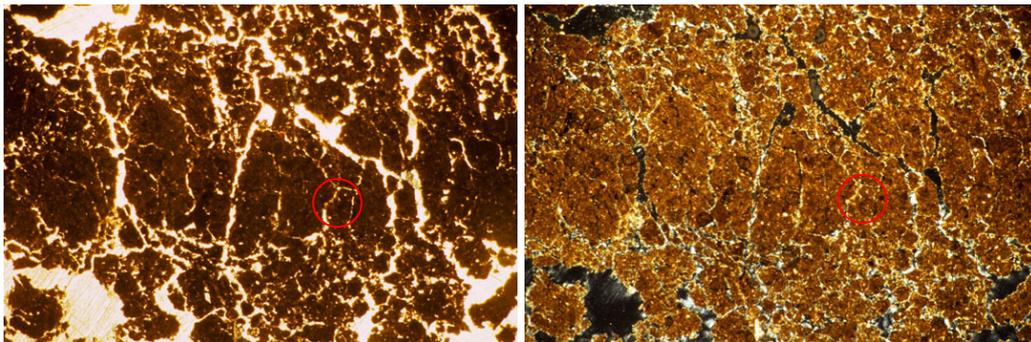
incompletos, con tamaño de 2.5 mm; en el tercer horizonte los rellenos son más grandes alcanzando los 7.0 mm. Los nódulos órticos típicos de yeso lenticular también son más grandes en el tercer horizonte (0.4 mm) que en el segundo (0.25 mm).

El incremento del contenido de yeso se puede deber tanto al ascenso como descenso de agua saturada en sulfato y en calcio, o quizás en yeso disuelto. El ascenso capilar del agua del subsuelo proveniente del horizonte yesoso presente después de los 80 cm de profundidad, por lo tanto saturadas en sulfato y calcio, se evapora o se agota por acción de las plantas, y el yeso se deposita o recristaliza en los huecos. El descenso del agua de riego utilizada en este sitio con concentraciones altas de iones sulfato y calcio (811 y 280 ppm, respectivamente, Pineda, 2001), se va sobresaturando conforme se pierde agua por evapotranspiración, llega un momento en que el sulfato y el calcio del agua o del suelo precipitan formando yeso.

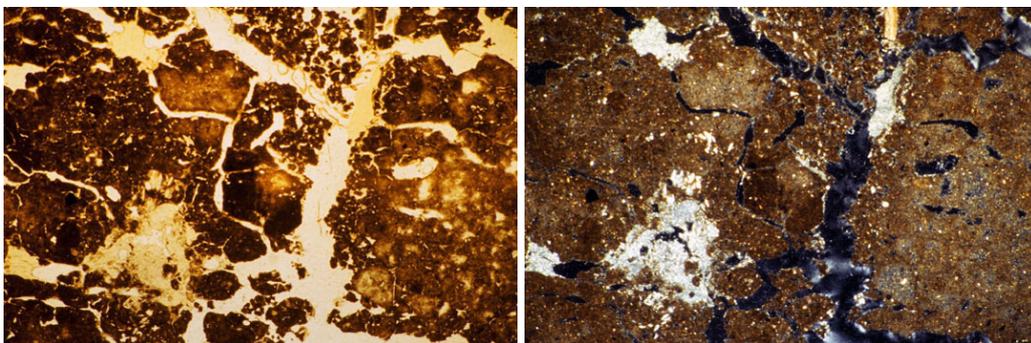
Para Jafarzadeh y Burnham (1992) predomina la formación de yeso por ascenso en climas muy áridos y por descenso en climas con aridez media. Mediante modelo de simulación utilizando agua de mina yesosa Annandale *et al.* (1999) encuentran que después de 30 años el yeso se acumula en el horizonte superficial reduciendo el volumen de poros en un 11.8 %, pudiendo reducir la aireación y la conductividad hidráulica. En la misma línea, Annandale *et al.* (2001) encontraron que la cantidad de yeso precipitado en el horizonte superficial en un periodo de 50 años se aproxima a 220 Mg/ha, con posible taponamiento de los poros del suelo, pero agregan que no constituye un grave problema debido a que las raíces logran “abrir” la estructura del suelo. Para Jafarzadeh (2002) es posible la acumulación de yeso en cantidad nociva si se permite el ascenso de agua freática con cantidad apreciable de calcio y sulfato.

En forma análoga a la secuencia de acumulación de carbonatos propuesta por Gile *et al.* (1966), Van Hoesen (2000) y Buck y Van Hoesen (2002) proponen el proceso de gipsificación y para ellos el estadio I consiste de filamentos, revestimientos y “pelotitas de nieve”; el II de nódulos de yeso; el III de nódulos de yeso levemente endurecido o yeso masivo (Tabla IV.18), no mencionan el estadio IV. Otros autores (Eswaran y Zi-Tong, 1981; Herrero, 1991; Stoops y Poch, 1994) también tratan el tema de la gipsificación sin relacionarlo con el proceso de carbonatación, en la Tabla IV.18 se adaptan a dicho proceso. Con base a lo anterior y a lo señalado en la Tabla IV.18, en

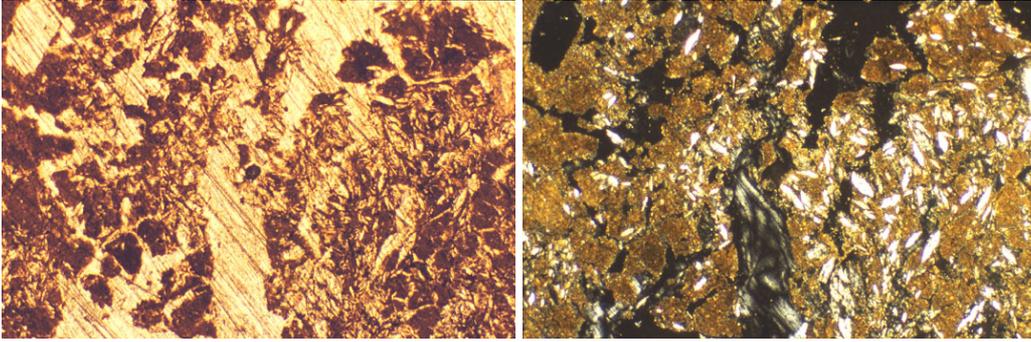
forma general se adapta el proceso de gipsificación por yeso lenticular en chesas (término aragonés para designar a los parajes de afloramientos de yeso) propuesto por Herrero (1991) e incorporando el concepto de fábrica en islas (Herrero *et al.*, 1992), el grado de acumulación de yeso en los primeros 80 cm (con predominio de material fino micrítico y arcilloso) y del horizonte gípsico inferior del pedión P5 comprende los estadios I, II y IV. El grado de acumulación de yeso en los primeros dos horizontes es I, en el tercer horizonte es grado II, y el cuarto y quinto horizontes se corresponden con el IV (horizonte gípsico inferior y no relacionado a la acumulación de yeso por uso de agua sulfatada). El estadio III no existe, aunque se podría considerar como tal a los primeros 2 cm del cuarto horizonte. Los grados I y II se corresponden con el yeso vermiforme descrito en campo. En las Figuras IV.300 a IV.309 se muestra la secuencia de acumulación de yeso y en la Tabla IV.18 se dan las características consideradas por estadio, incluyendo la formación de fábrica en islotes.



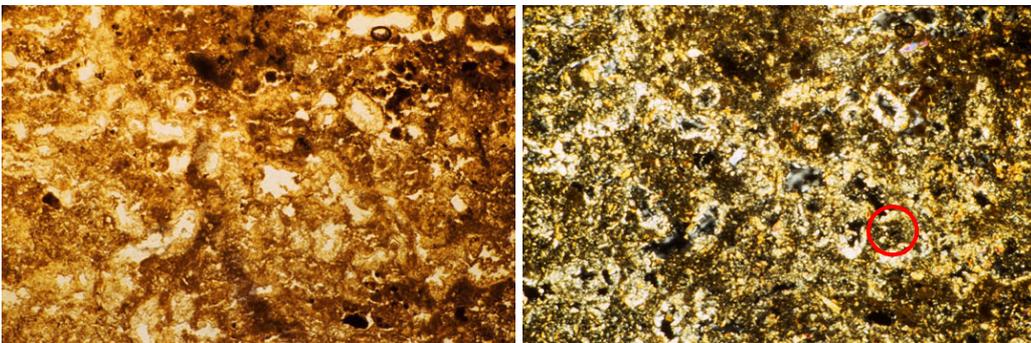
Figuras IV.300, LPP y IV.301, LPC. Grado I de acumulación de yeso. Primer y segundo horizonte, P5. Suelo con pocos revestimientos, nódulos o rellenos de yeso. Lado mayor 6.8 mm



Figuras IV.302, LPP y IV.303, LPC. Grado II de acumulación de yeso. Tercer horizonte, P5. Nódulos y rellenos de yeso comunes. Horizonte gypsico. Lado mayor 6.8 mm.



Figuras IV.304, LPP y IV.305, LPC. Grado III de acumulación de yeso. 2 cm superiores del cuarto horizonte. Fábrica en islas. Horizonte gypsico. Lado mayor 3.4 mm.



Figuras IV.306, LPP y IV.307, LPC. Grado IV de acumulación de yeso. Cuarto y quinto horizonte de P5. Islas limo-carbonático dispersas, Horizonte hipergypsico. Lado mayor 6.8 mm.

Tabla IV.18. Secuencia de carbonatación de suelos (Gile *et al.*, 1966) y de gipsificación (A) de Van Hoesen (2000) y Buck y Van Hoesen (2002). Adaptaciones, de manera tentativa, de Eswaran y Zi-Tong (B, 1991); estadios de evolución de materiales yesosos de Stoops y Poch (C, 1994); y en chesas de Herrero (D, 1991). Grado de acumulación de yeso en el pedión P5 incorporando el concepto de fábrica en islas de Herrero *et al.* (1992).

Estadio	Carbonatación	Gipsificación				Pedión P5
		A	B*	C*	D*	
I	Pocos filamentos o revestimientos débiles	Filamentos, revestimientos y “pelotitas de nieve” ( <i>snowball</i> )		Rellenos y/o revestimientos de yeso lenticular suelto, grueso a arena fina. Eogypsic (yeso < 10 %)	Crecimiento de yeso en hueco preexistente. Yeso lenticular	Pocos nódulos y revestimientos o rellenos de yeso en huecos preexistentes. Escaso yeso vermiforme
II	Nódulos de pocos a comunes	Nódulos de yeso	Cristales euhedrales en huecos, sin orientación. Rellenos en cavidades y canales. Yeso tabular o fibroso con fluctuación del nivel freático. Horizonte gypsic	Rellenos en bioporos y fisuras o irregularmente distribuido en la masa basal. Esta parte del Gypsic se pudiera considerar equivalente al estadio II. Yeso lenticular idio-hipidomórfico.	Crecimiento de yeso en hueco preexistente. Yeso vermiforme	Nódulos, rellenos o revestimientos de yeso de pocos a comunes. Yeso vermiforme. Horizonte gypsic
III	Muchos nódulos y rellenos internodulares	Nódulos de yeso levemente endurecido o yeso masivo	Acumulación en la franja de capilaridad, yeso lenticular euhedral, material original en huecos. Horizonte hipergypsic	fábrica en islas, nidos de celestina. Yeso microcristalino. Gypsic (yeso = 10-60 %)	Edaforrasgo gypsic lenticular continuo en la lámina, organización en islas. Horizonte gypsic-hipergypsic	Abundantes nódulos de yeso y revestimientos o rellenos de yeso. Organización en islas. Yeso vermiforme. Horizonte gypsic
IV	Incremento de la impregnación de carbonatos. Horizonte laminar		Cristales trabados, quebradizo, cementado, compacto, duro, impermeable. Horizonte petrogypsic	Fábrica en islas más desarrollada, dominancia de yeso microcristalino, nódulos, rellenos, y en bandas de yeso cementado, yeso xenotópico. Petrogípsico. Hypergypsic (yeso = 60-90 %), hologypsic (yeso > 90 %)	Edaforrasgo gypsic dominante, islas de finos dispersas. Horizonte hipergypsic	Predominio de yeso, organización en islas. Estructura laminar, masiva, o masiva-vesicular. Bandas de yeso soldado. Horizonte hipergypsic o petrogypsic

\* Los autores no hacen comparaciones con la propuesta de Gile *et al.* (1966).

#### 5.4. Resumen de la descripción de las secciones delgadas de suelo.

Para dar una visión de conjunto y facilitar las comparaciones a continuación se presentan los cuadros resumen de la micromorfología por pedión, según la presentación del suelo. La descripción micromorfológica se hace por lámina delgada indicando la profundidad de muestreo en centímetros y el número del pedión.

Tabla IV.19. Resumen de la descripción micromorfológica. Presentación del suelo en ladera, pedión P4.

Lámina	Microestructura	Huecos	Componentes orgánicos	Masa Basal		Edaforrasgos			Excrementos
				Grueso	Micromasa	Revestimientos	Rellenos	Nódulos	
P4:0-10	Pedialidad débil a moderada. Bloques subangulares débiles con bioporos, y laminar con vesículas	30 %. Bioporos y fisuras	Raíces de varias edades, restos orgánicos anhistos	g/f 1.5/8.5 porfirica abierta. Calcita, yeso lenticular, cuarzo	Amarillenta en LPP y gris en LPC. YMC. F-b microgípsica y estriada moteada,	Típicos de MO	Denso completo o incompleto esferoidales; mamilados denso completo o incompleto organo-mineral	Órticos típicos organo-mineral. típicos de YMC con micelios; típicos limo-carbonáticos; impregnativos de materia orgánica	De oribátidos y de lombrices
P4:10-20	Débil. Laminar con vesículas	40 %. Fisuras horizontales y vesículas	Pocas raíces	g/f 3.5/6.5 porfirica abierta. YLI y YLH, cuarzo.	Amarilla moteada. YMC. F-b microgípsica con micrita	Típicos de YX, YH, y de YMC; típicos de materia orgánica; e hiporrevestimientos de micrita	Denso completo o incompleto YX Incompleto denso limo-carbonáticos	Órticos típicos organo-mineral, típico YX, YMC	De oribátidos
P4:20-30	Apedial. Masiva con vesículas	20 %. Vesículas, fisuras y cámaras	Sin raíces	g/f 3.5/6.5 porfirica abierta. YX, cuarzo, calcita	Pardo en LPP y grisáceo en LPC, YMC. F-b microgípsica con micrita	Típicos de YX, YH, YMC. Típicos y de materia orgánica; hiporrevestimientos y cuasirrevestimientos limo-carbonáticos	Denso incompleto de YMC y de microesparita	Órticos típicos de YMC; órticos típicos de microesparita	De lombrices, mamilados coalescentes

F-b = Fábrica-b. LPP = Luz paralela plana, LPC = Luz paralela cruzada. YX = Yeso xenomórfico, YH = Yeso hipidiomórfico, YMC = Yeso microcristalino.

Continuación de la Tabla IV.19. Presentación del suelo en posición somital, pediones P9 y P12.

Lámina	Microestructura	Huecos	Componentes orgánicos	Masa Basal		Edaforrasgos			Excrementos
				Grueso	Micromasa	Revestimientos	Rellenos	Nódulos	
P9:0-10	Apédial. Masiva-laminar con cámaras, muy pocos bloques subangulares	25 %, cámaras, vesículas, canales	Raíces con o sin flobafeno, componentes orgánicos anhistos redondeados a amorfos amarillo a rojizo. Hifas	g/f 3.3/6.7 porfirica abierta, YLI, YLH ondulados con acreciones, YCG. Olivinos, calcita, fitolitos	Amarillento, yeso microcristalino F-b poro estriada y moteada.	Típicos YLI indentado; típicos de MO, de YMC	Sueltos discontinuos o continuos en bioporos, de YLH, MB; denso completo YLE	Órtico típico de YL equigranular o de YX, o de calcita citomorfa	De oribátidos, esferoidales coalescentes en cámaras
P12:0-5	Apédial, muy escasos bloques subangulares acomodados masivos, Masiva vesicular con tendencia laminar	20 %, vesículas, canales, fisuras horizontales	Raíces con o sin flobafeno, restos orgánicos anhistos, raros bioclastos rojizo amarillentos	g/f 3/2 porfirica simple, YLI con líneas de polvo, YLH orientación radial. Cuarzo, calcita citomorfa	Pardo amarillento en LPP y gris en LPC. YLM y microsparita. F-b microgíptica	Típicos de microsparita; típico de YI o YH con orientación radial en bioporos; típicos de materia orgánica.	Suelto incompleto organo-mineral y MB, redondeados; denso completo de MB en cámaras; denso completo de YI o YH en vesículas	Órtico típico de YMC asociado a raíz; órtico típico de YI o YX no asociado a raíz	De oribátidos, de lombrices
P12:30-40	Muy débil Masiva-laminar con vesículas	20 %, vesículas, canales, cámaras, fisuras	Muy pocos radicohistos amarillos, rojizos	g/f 3/2 porfirica simple, YLI más pequeños con orientación paralela a huecos. Calcita citomorfa, cuarzo, máficos	Bis	Típico limo-carbonato, de microsparita, de YH con orientación paralela; muy escasos típicos de materia orgánica.	Denso completo en cámaras de cuarzo, YI, calcita, microsparita; denso completo de YMC, YLI; suelto discontinuo de calcita citomorfa.	Órtico típicos de YI a YX, y de YMC; órtico típicos limoarcilloso correspondientes a islas.	De lombrices

F-b = Fábrica-b. LPP = Luz paralela plana, LPC = Luz paralela cruzada. YX = Yeso xenomórfico, YH = Yeso hipidiomórfico, YMC = Yeso microcristalino, YCG = Yeso cola de golondrina o en punta de flecha (YPF), YLE = Yeso lenticular equigranular. MO = Materia orgánica, MB = Masa basal.

Continuación de la Tabla IV.19. Presentación del suelo en valle ciego, pediones P10 y P13.

Lámina	Microestructura	Huecos	Componentes orgánicos	Masa Basal		Edaforrasgos			Excrementos
				Grueso	Micromasa	Revestimientos	Rellenos	Nódulos	
P10:0-10	Buena pedialidad, granular compleja-laminar, esponjosa, agregados esferoidal a bloques subangulares,	35 %, poros de empaquetamiento compuesto, fisuras horizontales, cámaras.	Raíces amarillo-pardo rojizo, radicohistos rojos, restos orgánicos anhistos rojos y amarillos, esporas, ostrácodos carbonatados	g/f 1/4, porfirica abierta. Esparita, cuarzo, esferulitas, whewellita, máficos, olivino.	Pardo en LPP y gris en LPC. Microesparita. F-b cristalítica microesparítica	Típicos de materia orgánica o de microesparita; hiporrevestimientos de empobrecimiento de calcio	Suelto discontinuo de MB en cámara	Órtico típico de esparita con interferencia pseudoaxial; disórtico típico de esparita; típicos anórticos con revestimientos de micrita	No detectados
P10:25-35	Moderada pedialidad, bloques subangulares esponjosos parcialmente acomodados	35% , poros de empaquetamiento compuesto, fisuras, cámaras, vesículas	Restos orgánicos anhistos rojos y amarillos, raíces frescas, ostrácodos	g/f 3/7, porfirica abierta. Esparita, cuarzo, máficos, olivino	Bis	Típicos de materia orgánica; raros hiporrevestimientos de empobrecimiento de calcio relacionados o no a huecos	Suelto discontinuo de MB, de excrementos, de pseudoesparita en áreas descarbonatadas	Disórtico típico densos limo carbonato; típico disórtico amorfo orgánico	De oribátidos y otros esféricos posiblemente de <i>Adelidae</i> o <i>Babionidae</i>
P10:40-50	Buena pedialidad, bloques subangulares esponjosos parcialmente acomodados	35 %, poros de empaquetamiento compuesto, fisuras, cámaras, vesículas	Pocas raíces flobafenizadas, paja, esporas, manto fúngico	g/f 3/7, porfirica abierta. Esparita, cuarzo, máficos	Pardo amarillento en LPP y gris verdosa en LPC. Microesparita. F-b cristalítica microesparítica	Raros típicos de materia orgánica; pocos típicos de microesparita; abundantes hiporrevestimiento de empobrecimiento de calcio, línea de presión	Suelto continuo o discontinuo de MB, esparita; suelto continuo de microesparita.	Órtico típico de microesparita, masivos con descalcificación	De oribátidos y otros esféricos posiblemente de <i>Adelidae</i> o <i>Babionidae</i> en menor cantidad
P10:95-105	Débil pedialidad, organización en islas	30 %, poros de empaquetamiento, canales, cámaras, fisuras, vesículas	Raras raíces, tejido orgánico amarillo a rojizo	g/f 2/3, porfirica cerrada a doble espacio. YI muy orientados a huecos con LP, YCG, cuarzo	Pardo amarillento de YLM y microesparita. F-b de microesparita y microgípsica. Organización en islas	Típicos de micrita; abundantes hiporrevestimiento de empobrecimiento de calcio, líneas de presión	Suelto continuo o discontinuo en bioporos de MB, suelto continuo de calcita pseudomorfa	Órtico típico de YX o YH; típicos disórticos de microesparita con revestimientos de micrita	No detectados

F-b = Fábrica-b. LPP = Luz paralela plana, LPC = Luz paralela cruzada. YX = Yeso xenomórfico, YH= Yeso hipidiomórfico, YMC = Yeso microcristalino, YCG = Yeso cola de golondrina o en punta de flecha (YPF), YLE = Yeso lenticular equigranular. MO = Materia orgánica, MB = Masa basal

Continuación, presentación del suelo en valle ciego.

Lámina	Microestructura	Huecos	Componentes orgánicos	Masa Basal		Edaforrasgos			Excrementos
				Grueso	Micromasa	Revestimientos	Rellenos	Nódulos	
P13:0-10	Buena pedialidad. Bloques subangulares los más grandes acomodados, con ligera disposición horizontal. Estructura de bloques subangulares laminares porosos.	40 %, fisuras las muy finas horizontales intra agregados, bioporos	Raíces, raros componentes orgánicos anhistos, circulares-anélicos, hifas, bioclastos calcificados.	g/f 1/9, porfirica abierta. Calcita, cuarzo, máficos, feldespato, whewellita, YL	Pardo punteada. Microesparita, calcita, cuarzo. F-b cristalítica microesparítica	Hiporrevestimientos limo carbonáticos; típicos de microesparita; hiporrevestimientos de empobrecimiento con o sin relación a huecos o a raíces	Suelto discontinuo de MB, raíces y excrementos, excremento, microesparita	Órticos típicos y geódicos de microesparita	De oribátidos, esféricos a ovalados quizás de <i>Adelidae</i> o <i>Babionidae</i>
P13:20-30	Buena pedialidad. Bloques subangulares parcialmente acomodados, con bioporos	35 %, fisuras, canales, de empaquetamiento simple, cámaras	Raíces, muy raros componentes orgánicos anhistos, circulares, muy escasas hifas	g/f 1/9, porfirica abierta. Calcita, esparita iridiscente, cuarzo, máficos, biotita.	Bis	Raros típicos de materia orgánica; típicos e hiporrevestimientos de microesparita; hiporrevestimientos de empobrecimiento de calcio, líneas de presión limo-arcillosas	Denso incompleto de microesparita; denso incompleto yuelto discontinuo de MB	Órticos típicos denso y geódico-de microesparita, medianamente impregnativos de materia orgánica,, disórtico típico con bandas birrefringentes	De oribátidos, esféricos quizás de <i>Adelidae</i> o <i>Babionidae</i> , o cilíndricos <i>Lymnophilidae</i>
P13:60-65	Buena pedialidad. Granular esponjosa con bioporos	40 %, poros de empaquetamiento compuesto, canales, vesículas, cámaras	Raras raíces, muy raros componentes orgánicos anhistos pardos y rojos	g/f 1/9, porfirica abierta. Calcita, esparita, cuarzo, feldespato	Bis	Hiporrevestimientos de empobrecimiento de calcio; líneas de presión arcillosas intra-agregados, típicos de microesparita	Suelto discontinuo de MB; suuelto continuo de MB y de excremento	Órticos típicos de microesparita; fuertemente impregnativo de materia orgánica amorfo; disórtico típico limo arcillosos con líneas de presión	Frecuentes Oribátidos <i>Lymnophilidae</i>
P13:80-85	Débil pedialidad. Bloques subangulares parcialmente acomodados	20%, fisuras, bioporos, vesículas	Raras raíces, raros componentes orgánicos anhistos ojos, esporas, diatomeas	g/f 3/2, de porfirica cerrada a espacio simple. YI con LP, con acreciones, YCG, YH con LP angulares, microesparita, feldespato	De color pardo. YLM y microesparita. F-b microgípsica con microesparita	Típicos de naturaleza arcillosa, fragmentados,, típicos de microesparita y de micrita	Denso completo de YL,, suuelto discontinuo, fragmentados arcillosos grano F-b estriada o cruzada.	Órtico típicos de YLI equigranular, YX, islas limo-arcillosos con bandas birrefringentes	De oribátidos, cilíndricos posiblemente de <i>Lymnophilidae</i> , de lombrices

F-b = Fábrica-b. LPP = Luz paralela plana, LPC = Luz paralela cruzada. YX = Yeso xenomórfico, YH= Yeso hipidiomórfico, YMC = Yeso microcristalino, YCG = Yeso cola de golondrina o en punta de flecha (YPF), YLE = Yeso lenticular equigranular. MO = Materia orgánica, MB = Masa basal.

Continuación de la Tabla IV.19. Presentación del suelo en planicie con horizonte yesoso somero, pediones P7, P11 y P14.

Lámina	Microestructura	Huecos	Componentes orgánicos	Masa Basal		Edaforrasgos			Excrementos
				Grueso	Micromasa	Revestimientos	Rellenos	Nódulos	
7:0-10	Apedral. Bloques subangulares muy débiles en los primeros dos cm. Masivo con canales.	20 %, canales, vesículas, cavidades	Raíz, componentes orgánicos anhistos, esporas.	g/f 3/1, quitónica, YLI orientado a huecos, con líneas de polvo, YCG fragmentado, esparita, cuarzo, olivino, máficos	Pardo amarillento de YLM y microesparita, F-b microgípsica con microesparita	Típico de YLI, típico de microesparita	Suelto incompleto de MB, algunos subredondeados	Órtico típico de microesparita; órtico típico organo mineral con o sin YL; típico disórtico redondeado de microesparita	Mamilados correspondientes a lombrices
11:0-10	Débil pedialidad. Muy raros bloques subangulares. Masiva-laminar muy fina con vesículas	25 %, fisuras horizontales, poros de empaquetamiento, vesículas, bioporos	Raíces con o sin flobafeno, radicohistos, manto fúngico	g/f 5.5/4.5, porfirica espacio simple. YLI inequigranular moderadamente orientados a huecos, cuarzo, calcita, máficos	Pardo amarillento LPP y grisácea en LPC. YLM, microesparita y cuarzo, F-b microgípsica con microesparita	Típicos de MO; hiporrevestimientos limo carbonático; revestimiento radial de YH; típico en huecos de YX a YI	Denso completo de YMC; denso incompleto de YL-microesparita-excretas; denso incompleto de MB	Órtico típico de YL-CME; típico disórtico de YMC	Algunos quizá sean de larvas de <i>Adelidae / Babionidae</i>  Otros son de oribátidos
11:10-20	Apedral. Masiva-laminar fina con vesículas	20 %, vesículas, fisuras horizontales, canales	No detectados	g/f 5.5/4.5, porfirica espacio simple. YLI inequigranular, máficos, cuarzo, esparita	Pardo amarillento LPP, F-b microgípsica con microesparita	Típico de YX, YI paralela o radial; típico de MO; hiporrevestimiento de micrita	Denso completo de YL; denso incompleto de YL; suelto completo de YL	Órtico típico de YMC, y de YI e YH	Basidio cilíndrica truncada F-b microesparita o grano estriada <i>Tipulidae</i>
11:30-35	Débil pedialidad. Laminar	30 %, fisuras horizontales, vesículas	No detectados	g/f 3/2, porfirica espacio simple. YLI, YH, con líneas de polvo, orientación paralela a fisuras	Pardo amarillento LPP y grisácea en LPC. YLM, micrita y cuarzo, F-b microgípsica con microesparita	Yeso geopetal, típico de YX parcialmente soldado, radiales	Denso incompleto o completo de YI o YX	Típico de YMC	No detectados
11:55-60	Pedialidad muy débil. Masiva-laminar vesicular	20 %, vesículas, fisuras horizontales, canales	No detectados	g/f 6.5/3.5, porfirica espacio simple YLI a YX, calcita citomorfa, cuarzo	Pardo amarillento LPP, F-b microgípsica con microesparita	Paralelo o radial de YLI a YLH, parcialmente soldados; hiporrevestimientos de micrita y de empobrecimiento de Ca	Denso completo de YL, y de YMC; denso incompleto de YX	Órtico típico de YMC o de YL	No detectados

F-b = Fábrica-b. LPP = Luz paralela plana, LPC = Luz paralela cruzada. YX = Yeso xenomórfico, YH= Yeso hipidiomórfico, YMC = Yeso microcristalino, YCG = Yeso cola de golondrina o en punta de flecha (YPF), YLE = Yeso lenticular equigranular. MO = Materia orgánica, MB = Masa basal.

Continuación, presentación del suelo en planicie con horizonte yesoso somero.

Lámina	Microestructura	Huecos	Componentes orgánicos	Masa Basal		Edaforrasgos			Excrementos
				Grueso	Micromasa	Revestimientos	Rellenos	Nódulos	
P14:0-5	Pedialidad moderada. Bloques subangulares, y granular interagregado cony nódulos carbonáticos	35 %, poros de empaquetamiento, fisuras horizontales intra agregados, cámaras, canales	Raíces con o sin flobafeno, pelos radiculares con o sin calcificación, restos orgánicos anhistos rojos o amarillos, hifas	g/f 1/3, porfirica abierta. Calcita con macla polisintética, microesparita zonning o radial, cuarzo, máficos, biotita	Pardo amarillento moteado, microesparita, calcita, cuarzo. F-b microesparítica	Típico de MO; típico oxi-hdróxidos de Fe; típicos e hiporrevestimientos de micrita; hiporrevestimientos de empobrecimiento de calcio	Sueltos continuos o discontinuos de MB; nódulos carbonáticos, cuarzo y calcita; suelto continuo organo-mineral subredondeado	Muy abundantes carbonáticos. Órticos típicos, radiales, concéntricos, sueltos o agregados; impregnativos de MO amorfos	De oribátidos y quizás de <i>Adelidae</i> o <i>Bibionidae</i>
P14:5-10	Apedial. Masiva-laminar vesicular	15 %, vesículas, fisuras horizontales	Restos orgánicos anhistos rojos	g/f 3/7, porfirica abierta. YH orientación paralela y radial a huecos, YLI, YX	Amarillento punteado, YMC. F-b gípsica microcristalina y poroestriada	Típico e hiporrevestimientos de micrita y microesparita; típico y paralelos de yeso lenticular y típicos de YMC	Denso completo de YL; suelto discontinuo de microesparita y de MB	No detectados	No detectados
P14:20-25	Pedialidad moderada. Bloques subangulares y granular con bioporos y nódulos carbonáticos	25 %, poros de empaquetamiento compuesto, canales, cámaras, fisuras	Raíces, restos orgánicos anhistos rojos	g/f 1/3, porfirica abierta. YL, calcita, cuarzo, máficos, ortoclasa, biotita, whewellitita, olivino	Pardo amarillento moteada, YMC, microesparita, calcita, cuarzo, F-b gípsica microcristalina	Típico MO, de micrita, y de microesparita; radial de YL	Denso completo o incompleto y de YMC y MO; suelto discontinuo de nódulos, YMC, y de MB	Abundantes carbonáticos; órticos típicos radiales aislados o agrupados; órticos típicos de YMC, y organo-mineral	De oribátidos
P14:40-50	Apedial. Masiva con organización en islotes limoso arcillo-carbonato	15 %, vesículas, fisuras, cámaras	No detectados	g/f 4.5/5.5, porfirica simple espacio. YLI con orientación a huecos e islas, YLH, cuarzo, esparita, biotita	Pardo amarillento-rojizo, YMC, microesparita. F-b microesparítica y microgípsica, organización en islas	Paralelo o radial de YLI y YLH; hiporrevestimientos de empobrecimiento de calcio en islas	Denso completo de YL y de MB; suelto discontinuo de MB y YMC; denso completo de yeso indentado	Órtico típico-agregado de microesparita, YH, calcita, de YMC, de yeso policristalino; mediana a fuertemente impregnativo de MO	No detectados

F-b = Fábrica-b. LPP = Luz paralela plana, LPC = Luz paralela cruzada. YX = Yeso xenomórfico, YH= Yeso hipidiomórfico, YMC = Yeso microcristalino, YCG = Yeso cola de golondrina o en punta de flecha (YPF), YLE = Yeso lenticular equigranular. MO = Materia orgánica, MB = Masa basal.

Continuación de la Tabla IV. Presentación del suelo en planicie con horizonte yesoso somero, fase salina, pediones P1, P6 y P8.

Lámina	Microestructura	Huecos	Componentes orgánicos	Masa Basal		Edaforrasgos			Excrementos
				Grueso	Micromasa	Revestimientos	Rellenos	Nódulos	
1:5-15	Pedialidad buena. Bloques subangulares parcialmente acomodados y granular compuesta	35%, fisuras, poros de empaquetamiento compuesto, vesículas, cámaras canales	Raíces con o sin flobafeno, esporas, ostrácodos	g/f 2/3, porfirica abierta. YL cuarzo, calcita, microesparita y esparita, máficos	Pardo amarillento, yeso, microesparita, cuarzo, calcita, MO. F-b microgípsica con microesparita	Típico de MO, de microesparita; hiporrevestimientos de empobrecimiento de calcio	Denso incompleto y completo de YL,	Disórticos típicos limo-carbonáticos; típicos organo-minerales; típicos YMC; disórtico típico de calcita pseudomorfa	De oribátidos y de lombrices
1:35-45	Pedialidad moderada, en el primer tercio es de bloques subangulares parcialmente acomodados, en el segundo tercio es organización en islas y después es laminar	35 %, poros de empaquetamiento compuesto, fisuras horizontales, cámaras canales	Raíces parcialmente flobafenizadas, hifas sobre YMC	g/f 1.5/8.5 y 2/1, porfirica abierta y cerrada. YLI con LP, cuarzo, esparita, calcita pseudomorfa en raíz	Pardo amarillento, yeso, cuarzo, calcita, MO. F-b microgípsica con microesparita	Típicos de MO; hiporrevestimientos limo-carbonato y de microesparita; típicos de calcita	Suelto continuo y denso completo de YMC, YL; denso completo curvados	Órticos típicos limo-carbonáticos de calcita, micrita y esparita, septáricos; típicos o dentados vesiculares de microesparita; típicos de YMC; órticos típicos esparíticos	De oribátidos y de lombrices
1:55-65	Pedialidad débil, laminar con vesículas	25 %, fisuras horizontales, vesículas, canales, cámaras	Raíces flobafenizadas asociadas a YMC	g/f 2/1, porfirica cerrada. YLI orientado con LP, calcita, cuarzo	Amarillento, yeso. F-b gípsica lenticular o microcristalino	Radial de YL; típicos de microesparita	Suelto o denso incompleto YL; densos incompletos curvados	Típicos, densos de YMC	De lombrices
1:100-110	Pedialidad débil, laminar con vesículas	20 %, fisuras, vesículas, cámaras, canales	Restos de ostrácodos carbonatados	g/f 3/1, porfirica cerrada. YLI orientado con LP, microesparita	Bis	Bis	Denso completo o incompleto de YL, YMC	Típicos de YL equigranular	De lombrices

F-b = Fábrica-b. LPP = Luz paralela plana, LPC = Luz paralela cruzada. YX = Yeso xenomórfico, YH= Yeso hipidiomórfico, YMC = Yeso microcristalino, YCG = Yeso cola de golondrina o en punta de flecha (YPF), YLE = Yeso lenticular equigranular. MO = Materia orgánica, MB = Masa basal.

Continuación de la, presentación del suelo en planicie con horizonte yesoso somero fase salina

Lámina	Microestructura	Huecos	Componentes orgánicos	Masa Basal		Edaforrasgos			Excrementos
				Grueso	Micromasa	Revestimientos	Rellenos	Nódulos	
P6:0-8	Pedialidad débil. Bloques subangulares en la parte superior y luego laminar con vesículas	20 %, vesículas, cámaras, canales fisuras	Raíces con o sin flobafeno, componentes orgánicos anhistos pardo amarillento-rojizo	g/f 3/1, porfirica cerrada a espacio simple. YLI con LP, ondulado, YCG quebrados, cuarzo, olivino, whewellita	Amarillenta, F-b yeso microcristalino punteada	Típico de MO, de microesparita, o de MB sobre la raíz	Denso incompleto de YMC; suelto discontinuo de YL, de MB arqueado	Órtico típico de micrita, de calcita pseudomorfa, de YMC	De oribátidos
P6:24-34	Apedial, masiva vesicular	25 %, vesículas, Cavidades, canales, cámaras	Raíces, radicohistos	g/f 7/3, porfirica cerrada a espacio simple. YL muy orientado, con LP YCG	Bis	Típicos de microesparita, paralelos de YL, típicos de MO	Suelto discontinuo de MB; denso completo o incompletos de YL	Órtico típico de YMC, de micrita, de microesparita	De lombrices coalescentes, de oribátidos
P6:50-60	Laminar débil con vesículas	20 %, fisuras horizontales, vesículas, canales, cámaras	Muy escasas raíces, radicohistos	g/f 3/1, porfirica cerrada a espacio simple. YLI, YCG	Bis	Típicos de microesparita, radial de YL	Suelto discontinuo de MB, o de YX, YH	Órtico típico de microesparita con o sin YL, órtico típico órgano-mineral, o de YI y YX	De lombrices
P8:0-10	1_ La costra es laminar ondulada, 2_ luego es masiva con cavidades 3_ masiva con cavidades	1_Costra 60 %, fisuras horizontales onduladas, poros de empaquetamiento compuesto. 2_20 % cavidades, cámaras 3_20 %, cavidades, canales, fisuras	1_ raíces 2_ Raíces, radicohistos bioclastos anhistos amarillos birrefringentes 3_ No detectados	1_g/f 3/2, porfirica abierta YL y YCG, halita, olivino 2_g/f 6.5/3.5, porfirica cerrada. YL y YCG con LP, olivino, calcita pseudomorfa, 3_g/f 3/1, porfirica cerrada. YCG con LP, celestina, yeso pseudotabular	1_pardo oscuro, F-b cristalítica microesparítica bandeada 2_pardo amarillenta F-b microesparítica y microgipsica 3_pardo amarillento F-b micrítica y microgipsica	1_casquetes enlazados ondulados de micrita, típicos de MO 2_casquetes enlazados ondulado de micrita, típicos de MO 3_Típicos limo-arcillosos o microesparíticos, típicos de YL	1_y 2_ No detectados 3_ Suelto discontinuo limo carbonáticos, suelto discontinuo o continuo de YL; denso completo o incompleto de celestina	1_ No detectados, 2_ típico disórtico de esparita; típico anórtico de lutítico, microesparítico; típico disórtico de esparita, órtico típico de YMC 3_disórtico típico limo-arcilloso-carbonáticos	No detectados
P8:15-25	Apedial. Masiva con cámaras	25 %, cámaras, cavidades, fisuras	Raíces	g/f 4/1, porfirica cerrada. YL maclado o no, YCG con LP, celestina	Pardo amarillenta moteada, arcillosa, F-b indiferenciada y grano estriada	Típicos limo arcilloso amarillentos birrefringentes; típicos fúngicos de color rojo	Denso incompleto de celestina; suelto discontinuo limo-arcilloso; suelto continuo de YL	No detectados	No detectados

F-b = Fábrica-b. LPP = Luz paralela plana, LPC = Luz paralela cruzada. YX = Yeso xenomórfico, YH= Yeso hipidiomórfico, YMC = Yeso microcristalino, YCG = Yeso cola de golondrina o en punta de flecha (YPF), YLE = Yeso lenticular equigranular. MO = Materia orgánica, MB = Masa basal.

Continuación de la Tabla IV.19. Presentación del suelo en planicie con horizonte yesoso somero fase salino sódica, pedión P3.

Lámina	Microestructura	Huecos	Componentes orgánicos	Masa Basal		Edaforrasgos			Excrementos
				Grueso	Micromasa	Revestimientos	Rellenos	Nódulos	
P3:0-10	Pedialidad buena a moderada. Granular esferoidal y bloques subangular, Laminar-granular con cámaras y granular compuesta.	30 %, poros de empaquetamiento compuesto, fisuras horizontales, vesículas, cámaras	Raíces activas o no, esporas agregadas, ostrácodos carbonatados, MO	g/f 3/7, porfírica abierta. YX a YH, cuarzo, máficos, calcita, plagioclasa	Pardo amarillento punteado, limo carbonático, arcilla, MO. F-b micrítica	Típicos de MO abundantes; típicos de microesparita, y posiblemente de Mn	Denso completo e incompleto de YLH y YX	Amorfos de color pardo amarillento F-b esponjosa. Órticos típicos de YH y YX	No detectados
P3:5-15	Pedialidad moderada Laminar con cámaras agregados en bloques subangulares	25 %, fisuras horizontales, canales, cámaras, vesículas	Muy escasa actividad de raíces	g/f 2/3, porfírica simple a doble espacio. YL maclado, YCG, con LP, orientados	Amarillenta con diafragma cerrado, yeso microcristalino, F-b microgíptica	Típicos de MO, de arcillo-limosos, de limo-carbonático, de YMC	Denso completo o incompleto de MB; suelto discontinuo arqueado y limo-arcillosos	Raros órticos típicos de YL y limo-arcillosos birrefringentes	De lombrices
P3:30-35	Pedialidad débil. Laminar ondulada con vesículas	20 %, fisuras horizontales y onduladas, vesículas	No detectados	g/f 3/2, porfírica cerrada. YLI orientado a huecos, YX, YCG con LP	Bis	Típicos ocasionales de MO; raros típicos de micrita; frecuentes revestimientos paralelos de YLI y YX	Suelto incompleto de MB y material limo arcilloso F.b indiferenciada o granoestriada	Órticos típicos de YL y material limo-arcilloso birrefringente; típico de de YH, de YX	De lombrices

F-b = Fábrica-b. LPP = Luz paralela plana, LPC = Luz paralela cruzada. YX = Yeso xenomórfico, YH= Yeso hipidiomórfico, YMC = Yeso microcristalino, YCG = Yeso cola de golondrina o en punta de flecha (YPF), YLE = Yeso lenticular equigranular. MO = Materia orgánica, MB = Masa basal

Continuación de la Tabla IV. Presentación del suelo en planicie con horizonte yesoso profundo, pediones P2 y P5.

Lámina	Microestructura	Huecos	Componente s orgánicos	Masa Basal		Edaforrasgos			Excrementos
				Grueso	Micromasa	Revestimientos	Rellenos	Nódulos	
P2:0-10	Pedialidad bien desarrollada, granular compleja con cámaras y canales. Agregados granulares esferoidales, bloques subangulares parcialmente acomodados	40 %, cámaras, poros de empaquetamiento o compuesto, canales, fisuras	Raíces, pelos radiculares sin o calcificados, componentes orgánicos anhistos, ostrácodos	g/f 1.5/8.5, porfírica abierta. calcita, cuarzo, biotita, feldespato, olivino	Pardo amarillento, punteada. Microesparita, limo-arcilloso. F-b microesparítica	Hiporrevestimientos de empobrecimiento de calcio; típico e hiporrevestimientos de microesparita, de micrita; impregnativos concéntricos de MO	Sueltos continuos o discontinuos esféricos de MB u organo-minerales; suelto discontinuo de microesparita	Órticos subredondeado lisos y fragmentado F-b grano estriada; órticos subredondeados lisos con revestimientos concéntricos de MO; típico anórtico esparita microesparita; órticos débil a fuertemente impregnativos MO	Esféricas quizás de <i>Adelidae</i> / <i>Babionidae</i> , Basilo-cilíndrica posiblemente de <i>Tipulidae</i> / <i>Lymnophilidae</i> , de lombrices
P2:30-40	Pedialidad bien desarrollada granular compleja con cámaras y canales. Agregados esferoidales bloques subangulares parcialmente acomodados	40 %, cámaras, poros de empaquetamiento o compuesto, canales, fisuras	Raíces flobafenizadas, ostrácodos, pelos radiculares calcificados	g/f 1.5/8.5, porfírica abierta. Calcita, cuarzo policristalino, plagioclasa, olivino, ortoclasa, moscovita	Bis	Bis	Bis	Típico, birrefringente, F-b estriada paralela; típico disórtico esparita, órtico impregnativo de MO	Esféricas quizás de <i>Adelidae</i> / <i>Babionidae</i> , Basilo-cilíndrica posiblemente de <i>Tipulidae</i> / <i>Lymnophilidae</i>

F-b = Fábrica-b. LPP = Luz paralela plana, LPC = Luz paralela cruzada. YX = Yeso xenomórfico, YH= Yeso hipidiomórfico, YMC = Yeso microcristalino, YCG = Yeso cola de golondrina o en punta de flecha (YPF), YLE = Yeso lenticular equigranular. MO = Materia orgánica, MB = Masa basal

Continuación, presentación del suelo en planicie con horizonte yesoso profundo.

Lámina	Microestructura	Huecos	Componente s orgánicos	Masa Basal		Edaforrasgos			Excrementos
				Grueso	Micromasa	Revestimientos	Rellenos	Nódulos	
P5:0-10	Pedialidad bien desarrollada. Granular compuesta	35 %. Poros de empaquetamiento o compuesto, fisuras, cámaras	Raíces y restos de tejido radicular, ostrácodos carbonatados	g/f 1.5/8.5, porfirica abierta. Esparita, calcita, máficos, YL, YCG con LP, cuarzo, piroxeno, olivino, plagioclasas, fitolito	Pardo amarillento punteado. Microesparita. F-b microesparítica	Típicos de MO, de microesparita	Densos incompletos de YL y YMC	Disórtico típico de YL	No detectado
P5:20-30	Pedialidad bien desarrollada. Granular y bloques subangulares acomodados. Granular compuesta	30 %, fisuras algunas intra agregados horizontales, canales, cavidades	Raíces ostrácodos carbonatados y otros amarillos	g/f 1/3, porfirica abierta. YL equigranular corroído, esparita, cuarzo, máficos, feldespatos	Bis	Típicos de MO, de YL paralelo a fisuras, de microesparita; hiporrevestimientos limo carbonáticos	Denso completo o incompleto de YL y YMC; suelto discontinuo de MB	Órtico típico de YMC y YL	Subredondeadas y cilíndricas quizás de <i>Lynnophilidae</i> , mamiladas de lombrices
P5:50-80	Bis	25 %, fisuras, canales, vesículas	Pocas raíces, ostrácodos carbonatados	g/f 1/3, porfirica abierta. YL equigranular ondulados, cuarzo, calcita, olivino	Bis	Típicos de MO; típicos e hiporrevestimientos limo carbonáticos; típicos de YL paralelo a fisura	Denso completo o incompleto de YL; suelto discontinuo de MB mamilado	Órtico típico de YL	Mamiladas de lombrices
P5:80-90	Pedialidad débil. Bloques subangulares y masiva con cavidades y cámaras. Organización en islas	20 %, cavidades, vesículas, fisuras, cámaras	No detectados	g/f 3/2, porfirica simple-cerrada. YL inequigranular, cuarzo, calcita	Amarillenta, microesparita, YMC. F-b microesparítica y microgípsica	Típico de YX, o de YH radial o paralela; hiporrevestimientos de empobrecimiento de calcio en islas de finos	Denso completo o incompleto de YL	Órtico típico de YX indentado	Muy escasos de lombrices
P5:95-105	Pedialidad débil. Masiva laminar con vesículas, Organización en islas	25 %, vesículas, cavidades, cámaras, fisuras	No detectados	g/f 6.5/3.5, porfirica cerrada a doble espacio. YL, esparita, cuarzo	Amarillenta, YMC y microesparita. F-b microgípsica con microesparítica	Típico de YX, o de YH radial o paralela; yuxtapuesto de YL; hiporrevestimientos de empobrecimiento de calcio en islas	Densos completos o incompletos de YI y YH	Órtico típico de YH y YX	Muy escasos de lombrices

F-b = Fábrica-b. LPP = Luz paralela plana, LPC = Luz paralela cruzada. YX = Yeso xenomórfico, YH = Yeso hipidiomórfico, YMC = Yeso microcristalino, YCG = Yeso cola de golondrina o en punta de flecha (YPF), YLE = Yeso lenticular equigranular. MO = Materia orgánica, MB = Masa basal.

### **5.5. Clasificación.**

La clasificación de los pediones, ordenados por su posición en el paisaje, se presenta en la Tabla IV.19. La clasificación se hace tanto con Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999) como con WRB (1999). Al aplicar estos sistemas se ha optado por no proponer nuevos criterios, o nuevos taxones, pese a que en algunos casos la clasificación no parece totalmente adecuada. Quizá investigaciones más detalladas de la geografía, constitución y funcionamiento de los suelos de la región, lleven en el futuro a proponer modificaciones de los sistemas empleados. Aquí, para mantener la clasificación de estos suelos dentro de Soil Taxonomy o de WRB en su configuración actual se han tomado decisiones no siempre totalmente satisfactorias. Más abajo se discuten aspectos de ambos sistemas cuya aplicación a los suelos estudiados ha planteado algún conflicto o ambigüedad.

Tabla IV.20. Clasificación de los pediones estudiados, ordenados por su posición en el paisaje y presentación del suelo.

Geoforma	Presentación del suelo	Pedión	Soil Survey Staff (1999)	WRB (1999)	
Ladera	en posición somital	P4	Petrogypsid típico, franco, gypsico,	Gipsisol epipétrico, hipergípsico	
		P9	térmico, superficial		
		P12	Haplogypsid léptico, limoso grueso, gypsico, térmico	Gipsisol hipergípsico, hiposálico, hiposódico	
Microrrelieve ondulado	en valle ciego	P10	Calcigypsid típico, fino, mezclado, superactivo, térmico	Kastanozem gípsico, orticálcico, siltico	
		P13	Calcigypsid típico, limoso fino, mezclado, superactivo, térmico	Gipsisol orticálcico, hipergípsico, hiposódico	
	en “joya”	P15	Calcigypsid típico, limoso grueso, carbonático, térmico	Kastanozem gípsico, orticálcico, siltico	
Planicie		P7, P11 P16	Haplogypsid léptico, limoso grueso, gypsico, térmico	Gipsisol hipergípsico Gipsisol hipergípsico, hiposódico	
		P14	Petrogypsid cálcico, franco, gypsico, térmico, superficial	Gipsisol epipétrico, orticálcico, hipergípsico	
		con horizonte yesoso somero	P1		Gipsisol hipergípsico, hiposálico, hiposódico
		P6	Haplogypsid léptico, limoso grueso, gypsico, térmico (Fase salina)	Gipsisol episálico, hiposódico, hipergípsico	
		P8		Solonchak gípsico, hiposódico, árzico	
		P3	Haplogypsid sódico, limoso grueso, gypsico, térmico (Fase salino-sódica)	Solonchak sódico, gípsico	
	con horizonte yesoso profundo	P2	Petrogypsid cálcico, limoso grueso, mezclado, superactivo, térmico	Gipsisol endopétrico, sódico, hiposálico, cálcico	
		p5	Haplogypsid típico, limoso grueso, mezclado, superactivo, térmico	Kastanozem gípsico, calcárico, siltico	

En Soil Taxonomy los 16 pediones quedan en seis subgrupos de suelo mientras que en la WRB quedan en ocho grupos de segundo nivel (Tabla IV.19). Las similitudes entre los dos sistemas de clasificación se aprecian en los niveles jerárquicos más altos. Todos los pediones son Gypsid según Soil Taxonomy, y Gipsisoles según WRB con algunas excepciones. La primera son los pediones P10, P15 y P5, que al tener horizontes

móllicos según la definición de WRB, quedan como Kastanozems en este sistema; sin embargo en Soil Taxonomy son Gypsisols al no reunir el clima los requisitos de clima. La segunda excepción son los pediones P8 y P3, que en WRB son Solonchaks por tener un horizonte sálico según los criterios de este sistema.

En el primer caso (pediones P10, P15 y P5) Soil Taxonomy no puede reflejar la presencia de un horizonte de características próximas al móllico, muy conspicuo en suelos yesosos, y de interés desde los puntos de vista genético y funcional. La solución sería modificar la definición de móllico o establecer alguna forma de recoger este carácter en niveles inferiores de la clasificación, o bien como Fase de suelos.

En el segundo caso (pediones P8 y P3) el carácter salino de los pediones aparece al nivel más alto en WRB. Como en Soil Taxonomy no aparece este carácter, se ha optado por añadir al nombre del suelo la mención Fase salina para el perfil P8, y Fase salino-sódica para el P3. Ambas menciones se presentan entre paréntesis en la Tabla IV.19. En esta línea Boixadera *et al.* (1999) utilizan la fase salina para suelos del valle del Segre, España, cuya principal limitante del desarrollo de los cultivos es la salinidad, la cual no es mostrada a nivel de familia en Soil Taxonomy.

Con Soil Taxonomy tampoco se refleja la salinidad de los pediones P1 y P6, por lo que también se recurre a asignarlos a Fase salina. En estos pediones WRB no expresa la salinidad al nivel más alto, pero sí en los inferiores lo cual se considera satisfactorio.

El carácter sódico del pedión P3 lo Soil Taxonomy a nivel de subgrupo, y WRB en el segundo nivel. Sin embargo en los pediones P1, P6, P13 y P16, el sodio de intercambio no alcanza para sódico en Soil Taxonomy, que no refleja esta característica de interés práctico; en cambio WRB la recoge a tercer nivel.

El uso en WRB de prefijos (*endo*, *epi*, *orti*, *hipo* e *hiper*) o de modificadores origina mayor número de nombres de suelo en este sistema. Por ejemplo los pediones P2 y P14 se clasifican como Petrogypsid cálcico en Soil Taxonomy, en la WRB como Gipsisol *epipétrico* y Gipsisol *endopétrico*, respectivamente, gracias a los prefijos. Asimismo los pediones P7, P11 y P6 en Soil Survey Staff (1999) se clasifican como Haplogypsid léptico limoso grueso, y en la WRB (1999) P7 y P11 como Gipsisol hipergípsico, *siltico*

y P6 como Gipsisol hipergípsico, *hiposódico*, sáltico. Esto sugiere que quizá si Soil Taxonomy utilizase prefijos se incrementaría el número de nombres de suelo, acercándose a la WRB.

En los apartados siguientes se compara el uso y significado de los horizontes de diagnóstico móllico y sáltico en WRB (1999) y Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999). Además, se discute la relevancia de la sodicidad en suelos yesosos y la aplicación de los modificadores Sáltico y Árzico en WRB (1999) a los pediones estudiados.

#### **Horizonte diagnóstico Móllico.**

De los 16 pediones estudiados, tres reúnen los requisitos para Móllico (P5, P10 y P15) según criterios de WRB (1999). Sin embargo, de acuerdo a Soil Survey Staff (1999), cumplen con todos los requisitos (especialmente P5) excepto en lo relacionado a la humedad. Con datos de la estación meteorológica de Villa Juárez (ubicada a unos 20 km del pedión P5), con temperatura promedio anual de 20.5 °C, precipitación total anual de 530 mm (García, 1988), y evaporación de 1900 mm (CNA, 2000), se tiene régimen de humedad arídico. Por tal razón este pedión, al igual que los otros dos, se clasifica como Aridisol (Haplogypsid típico).

Sin embargo, las características (color, estructura) de los primeros 80 cm del perfil P5, guardan más relación con Mollisols que con Aridisols, quedando la sensación de ser forzada su clasificación como Haplogypsid típico. Es decir no se ve muy típico ni tampoco muy háplico (Soil Survey Staff, 1999), como si no presentara rasgos distintivos. Este problema parece haberse planteado en el trabajo de Soria (2004), quien reporta suelos yesosos de la Zona Media con características para móllico, y por régimen de humedad los considera como Aridisols. Como otros autores han encontrado parecidos problemas, incluso bajo otros regímenes de humedad del suelo (Boixadera *et al.*, 1999), quizá se podría modificar la definición del epipedión móllico.

En la WRB (1999) al no estar subordinada la definición de Móllico a la disponibilidad de datos meteorológicos, no existe el problema planteado con Soil Survey Staff (1999). Por ello la taxonomía de los pediones P5, P10 y P15 se hace tomando en cuenta al horizonte diagnóstico móllico.

### **Horizonte sálico.**

Para Soil Survey Staff (1999) un horizonte sálico debe tener 15 cm o más de espesor; con al menos 90 días consecutivos con  $CE \geq 30$  dS/m; y el producto del espesor en cm por la CE ha de ser  $\geq 900$ . Esta definición es objetiva, pero exige tener información del clima del suelo, la cual en México como en muchos otros países no existe y solamente se pueden hacer estimaciones, algunas veces con datos meteorológicos registrados a decenas de kilómetros del lugar de interés. Por ello el requisito del clima es un inconveniente al definir el horizonte sálico, aunque ciertamente implica condición constante del suelo, de interés en el manejo.

Por otra parte, la WRB (1999) coincide con Soil Survey Staff (1999) en el espesor mínimo pero marca un valor de  $CE_{es}$  (15 dS/m 25 °C) menor al exigido por Soil Taxonomy (30 dS/m 25°C). Además la definición de WRB es ambigua y poco práctica, al requerir como *mínimo 1 % de sales, y el producto del espesor en cm por el porcentaje de sales debe ser  $\geq 60$* . El principal inconveniente es que no se dice cómo determinar el porcentaje de sales, o si esa acumulación de sales se puede inferir en campo. Cada investigador puede obtener ese 1 % de sales según su criterio, con el riesgo de usar técnicas no comparables. En esta línea, Boixadera *et al.* (1999) consideran poco útil el 1 % debido a dificultades o redundancia en su medición. Quizás sería más práctico multiplicar el espesor del horizonte salino por la  $CE_{es}$ , cuya determinación está especificada y es de amplia aceptación.

### **Relevancia de la salinidad/sodicidad en suelos yesosos.**

Los pediones P3 y P8 están afectados por salinidad, sobre todo P3, como se constata por la presencia de plantas halófilas, tales como *Suaeda nigrescens*, *Suaeda mexicana*, *Atriplex canescens*, y *Sporobolus airoides*. No están representadas las plantas gipsófilas, coincidiendo con Meyer (1980) en cuanto a que en suelos yesosos con alto contenido de sales las plantas halófilas sustituyen a las gipsófilas. Además también hay eflorescencia salina, por ejemplo en el pedión P8. En los primeros 2 cm del área del pedión P3, el suelo está suelto, es decir, con la consistencia “puffy” característica de suelos sódicos; asimismo hay manchones oscuros, o álcali negro, debidos a la dispersión de la materia orgánica por el sodio. Este material disperso retarda la infiltración, observándose encharcamiento en la época de lluvias.

La relevancia del contenido de sodio en suelos yesosos ha sido discutida por varios autores. Para Herrero y Bercero (1991), la abundancia de yeso en el suelo aleja el peligro de sodificación cuando se pone en riego, pese a la sodicidad del perfil, según constatan por la inexistencia de inestabilidad estructural en suelos yesosos de Quinto (Aragón, España). Herrero y Porta (2000) mencionan el efecto antagónico del yeso al de las sales más solubles al prevenir la dispersión de arcillas. Según Artieda (1996, 2004) tiene poco sentido hablar de sodicidad en suelos con alto contenido de yeso y apenas arcilla, caso de los pediones P3 y P8 del presente estudio; también indica la disminución del riesgo de desestabilización estructural si además la concentración de sales es alta. Artieda (1996) expresa que la presencia de yeso es contraria a la desestabilización estructural de suelos con elevada RAS (22 - 87) y  $CE_{es}$  (22 - 53 dS/m), no obstante plantea cautelas para el caso de su puesta en riego. En todo caso, debe señalarse que en el pedión P3 la RAS varía de 10.8 a 24.3 y la CE de 22 a 25 dS/m, valores menores a los reportados por el anterior autor.

La no alteración de la estructura en suelo yesoso con alto contenido de sodio se comprueba en el pedión P3, ya que su estructura es similar a la de otros pediones bajos en sodio. El efecto del sodio en la estructura del suelo se manifiesta en la superficie, cuyo contenido de yeso es menor, formando costra con estructura laminar, la cual cuando está seca tiene consistencia suelta. Artieda (1996) señala el taponamiento de poros en el horizonte superior con  $RAS > 15$  atribuyéndolo a obliteración de poros por lavado con agua de lluvia, interpretación concordante con las observaciones en el pedión P3.

El efecto de las sales más solubles que el yeso está en el potencial osmótico y en posible toxicidad, lo cual condiciona el establecimiento de las plantas citadas en párrafos anteriores. Los estudios de Vázquez (1997) consideran al maíz sensible al PSI, indicando que con un valor menor de 15 se pueden tener pérdidas del 50 % en este cultivo; la avena, el trigo y el sorgo toleran del 15 al 25 de PSI; y la alfalfa tolera un PSI superior a 25. Sin embargo estos datos no están referidos a suelos yesosos, por ello se deben tomar con reserva mientras no se investigue si dichos cultivos tienen comportamiento similar en este tipo de suelo.

A raíz de lo discutido en los dos párrafos anteriores, y desde el punto de vista productivo, puede tener sentido hablar de sodicidad en suelos yesosos.

#### **Uso del calificador Siltico en WRB (1999).**

Siltico se usa como modificador a nivel inferior en la WRB (1999), exigiendo 40 % o más de limo en un horizonte de más de 30 cm de espesor, dentro de los 100 cm desde la superficie del suelo. En suelos con alto contenido de yeso tiene poco sentido, debido a los problemas al determinar el tamaño de partículas (Hesse, 1976; Poch, 1992b). Herrero (1991) encontró abundantes problemas en la determinación del tamaño de partículas con el método de la pipeta Robinson, y en muchas de las muestras resultó inaplicable. Artieda (2004) reporta floculación del suelo a partir de 15 % de yeso y no determina la textura en esas muestras.

El calificador Siltico podría aplicarse a 14 de los pediones estudiados a la vista de los datos de granulometría. Sin embargo en 11 de ellos (P1, P3, P4, P6, P7, P8, P9, P11, P12, P14 y P16) el contenido de yeso en los dos primeros horizontes va desde 14 a 93 %, debiendo tomarse con reserva los valores de limo reportados, por ello se ha preferido no utilizar este modificador que, por otro lado, no aporta ninguna discriminación a la clasificación de estos pediones. Los otros tres pediones (P5, P10 y P15), tienen contenidos de yeso menores en el espesor de suelo utilizado para diagnosticar el carácter, por ello se consigna modificador en su clasificación (Tabla IV.19).

#### **Calificador Árzico en WRB.**

Es un calificador exclusivo de los Gipsisoles (WRB, 1999). Se aplica cuando hay una capa de agua rica en sulfatos, dentro de los 50 cm desde la superficie del suelo en algún periodo de la mayoría de los años, y el suelo contiene 15 % o más yeso promediado en una profundidad de 100 cm. Estas condiciones se reúnen en el pedión P8, pero también es posible que se lleguen a tener en el pedión P3, debido a que se inunda en la época de lluvias y cumple con el requisito de contenido de yeso. Asimismo los pediones P10 y P13, situados en zona deprimida con influencia del agua de lluvia, y con porcentaje de yeso alto (52.8 y 62.9 % respectivamente) pudieran merecer el calificador Árzico, pero éste no se emplea por estar secos los suelos en la fecha de muestreo. Es necesario el estudio del flujo de agua superficial así como de la variación del nivel freático.

En cuanto a la clasificación de los suelos estudiados la WRB (1999) ha sido más flexible que Soil Survey Staff (1999). Ello porque Soil Taxonomy es más estricta en la definición de los horizontes diagnóstico, lo cual da más solidez a la clasificación por este sistema. La WRB atiende más a cuestiones de manejo, sobre todo a nivel inferior. Uno de los objetivos finales de los sistemas de clasificación de suelos es ser de ayuda en cuanto al uso y manejo de los suelos, en esta línea quizá la WRB sea de más utilidad en el manejo de los suelos yesosos estudiados. Por otro lado, con el presente estudio se han caracterizado satisfactoriamente a los suelos yesosos de San Luis Potosí, ya que se considera que los pediones estudiados son representativos de la variación (contenido de yeso, profundidad del horizonte yesoso, sales, relieve, etc.) de este tipo de suelo de tanto de la Zona Media y del Altiplano potosino.

## **6. CONCLUSIONES**

### **Morfología y clasificación**

Los contenidos de yeso determinados en laboratorio son, para algunas muestras, claramente inferiores a lo estimado en el corte delgado del horizonte correspondiente. Ello se atribuye a los conocidos problemas analíticos del yeso, por lo que se recomienda dar más crédito en esos casos a la estimación en el corte delgado.

Según las secciones delgadas, ninguno los suelos con alto contenido de arcilla reúnen los requisitos para horizonte diagnóstico Argílico, concordando con las observaciones en campo y los análisis de laboratorio. Así, suelos considerados hasta el momento como vertisoles, quedan ahora clasificados como Aridisoles (Soil Survey Staff, 1999) y como Kastanozem (WRB, 1999).

Se ha actualizado la clasificación de los suelos yesosos de la Zona Media y del Altiplano potosino según criterios de Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999) y de la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB, 1999). En el estudio están representados suelos yesosos del estado de San Luis Potosí: en diferente posición del paisaje, con horizonte gypsico a varias profundidades, con horizonte petrogypsico, y en condiciones salinas. Los resultados serán aplicables al manejo de los suelos yesosos, y permiten iniciar una base de datos para posterior investigación, siendo de aplicabilidad en otras áreas yesosas similares.

Las diferencias en las definiciones de conceptos similares en WRB (1999) y en Soil Survey Staff (1999) conducen a una clasificación y nomenclatura de estos suelos no coincidente en ambos sistemas. Así ocurre en la definición del epipedión Móllico y del endopedión Sáfico. Con el epipedión Móllico (pediones P5, P10 y P15) fue debido a la importancia que se le da al clima en su definición en el segundo sistema, más no en el primero.

En Soil Taxonomy el horizonte móllico (pediones P5, P10 y P15), por su definición, es incompatible con el orden Aridisoles. También el horizonte Sáfico (P3 y P8) tiene requisitos más estrictos en Soil Taxonomy que en WRB. Por otro lado, el modificador Sáfico, usado a nivel inferior en WRB, se considera en la práctica inaplicable a suelos

con alto contenido de yeso, debido a las imprecisiones del análisis granulométrico por métodos de sedimentación, asociadas al alto contenido de yeso.

El análisis por difracción de rayos X permitió conocer los principales minerales de estos suelos. Esta técnica ha identificado, además del yeso, la calcita, el cuarzo y el feldespató; de los minerales de la arcilla destacó la montmorillonita.

### **Procesos formadores**

El hábito de yeso dominante es el lenticular, excepto en el pedión P8 donde predomina el yeso con macla en punta de flecha o cola de golondrina y el pseudotabular. El yeso lenticular a menudo tiene distribución y orientación paralela a huecos o a los granos de yeso más grandes, indicando la importancia de los procesos de disolución-re cristalización del yeso. Abundan las inclusiones o líneas de polvo en los granos de yeso más grandes.

Se ha constatado la gran similitud (en color, sensación al tacto, estructura, etc.) del yeso descrito como farináceo en campo, y como microcristalino al microscopio, con el existente en el valle del Ebro, España. Esta coincidencia y la concordancia con las descripciones de diversos autores en África, Australia, U.S.A., permite suponer una amplia distribución de este material, aunque su proceso o procesos de formación no estén esclarecidos.

La descarbonatación se manifestó principalmente en las islas y agregados de material fino limocarbonático. Se encontró asociada a actividad de raíces y a macroporosidad conductora de agua. Fue común encontrar neoformación de calcita asociada a áreas de descarbonatación. Las islas descalcificadas también se encontraron en los horizontes gypsicos e hipergypsicos, que por lo regular tienen organización en islas.

En suelos inundables en la época de lluvias (pediones P3 y P8), con alto contenido de sodio intercambiable, bajo contenido de carbonato de calcio equivalente (menor o igual al 1.5 %), contenido de yeso relativamente bajo (menor al 14 %) y contenido de arcilla en los primeros 3-5 cm superficiales mayor al 16 %, se observó descalcificación de la micromasa limo-carbonática. Este material fino en suspensión emigró a profundidad a través de la macroporosidad conductora, manifestándose en bioporos rellenos con

micromasa limo-arcillosa, e incluso en algunos revestimientos limo-arcillosos birrefringentes, sin laminación, a veces no límpidos, de color amarillento en LPP, sobre granos de yeso cercanos al bioporo. Es común la reorientación de arcilla por el crecimiento desplazante del yeso lenticular.

La actividad de raíces se concentra en el horizonte superficial, siendo poca la actividad radicular en los horizontes gypico e hipergypico. Es común encontrar la raíz asociada a restos de excrementos de oribátidos. Ello, junto con la actividad de lombrices, indica la importancia de la mesofauna en la formación de suelo. La materia orgánica se presenta principalmente a manera de revestimientos en minerales y agregados, las más de las veces flobafenizada. También fue frecuente encontrarla, al igual que hifas, asociada a yeso microcristalino.

Los revestimientos dominantes correspondieron a yeso lenticular idiotópico en huecos o sobre raíces; o de yeso hipidiotópico y xenomórfico en vesículas y en fisuras de horizontes hipergypicos. Le siguieron en importancia los revestimientos típicos de micrita o microesparita.

El grado de acumulación de yeso en los primeros 80 cm de profundidad del pedión P5, se asocia al uso de agua de riego rica en iones sulfato y calcio; es probable que a futuro se acumule yeso a tal grado que requiera manejo diferenciado. Esta gipsificación aparece en campo como yeso vermiforme y en secciones delgadas como rellenos y revestimientos de yeso lenticular.

### **Fabricación de láminas delgadas**

Se ha constatado la necesidad de respetar las condiciones de fabricación de láminas delgadas de materiales yesosos, en las cuales han insistido diversos autores. Así, la aparición de bassanita en el pedión P3 se considera un artefacto por calentamiento.

## 7. LITERATURA CITADA.

- Adams, A. E., MacKenzie, W. S., y Guilford, C. 1997. Atlas de rocas sedimentarias. Traducción de Lago, Sn. J. M., y Arranz Y. E. Masson, S. A. Madrid. 106 pp.
- Aguilera, N., Soria, J. C., Carral, M. P., Ballesta, R. y Guerra, A. 1997. Clasificación provisional de los suelos de las regiones áridas del estado de San Luis Potosí, México. *Boletín de la Sociedad de la Ciencia del Suelo*, 3-2: 217 – 225.
- Allen B. L. 1985. Micromorphology of aridosols. P: 197 – 216. In: Douglas, L. A., y Thompson, M. L. (Editors). *Soil micromorphology and soil classification*. SSSA *Special Publication No 15*. Madison, WI53711.
- Alphen, J. G. van y De los Ríos, R. F. 1971. Gypsiferous soils. Notes on their characteristics and management. International Institute for Land Reclamation and Improvement. *Bulletin* 12:1-44.
- Amit, R., y Yaalon, D. H. 1996. The micromorphology of gypsum and halite in Reg soils-the Negev Desert, Israel. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol 21:1127-1143.
- Annandale, J.G., Jovanovic, N.Z., Benadè, N., y Tanner, P.D. 1999. Modelling the long-term effect of irrigation with gypsiferous water on soil and water resources. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 76: 109 – 119.
- Annandale, J.G., Jovanovic, N.Z., Pretorius, J.J.B., Lorentz, S.A., Rethman, N.F.G., y Tanner, P.D. 2001. Gypsiferous mine water use in irrigation on rehabilitated open-cast mine land: Crop production, soil water and SALT balance. *Ecological Engineering* 17: 153 – 164.
- Arricibita, V. F. J., Iñiguez, H. J. y Val Legaz, R. M. 1988. Estudio de los Gypsiorthids de Navarra. *Anales de Edafología y Agrobiología* 47 (1-2): 199 – 220.
- Artieda, O. 1996. Génesis y distribución de suelos en un medio semiárido. Quinto (Zaragoza). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid, España. 222 pp.
- Artieda, O. 2004. Materiales parentales y geomorfología en la génesis de Aridisoles en un sector del centro del valle del Ebro. Tesis de doctorado, Universidad de Zaragoza, CITA-DGA, España. 586 pp.
- Artieda, O., y Herrero, J. 2003. Pedogenesis in lutitic Cr horizons of gypsiferous soils. *Soil Science Society of American Journal* 67: 1496 – 1506.

- Barzanji, A. F., y Stoops, G. 1974. Fabric and mineralogy of gypsum accumulation in soils of Iraq. P: 271-277. In A. D. Voronin *et al.* (ed.) *Trans. Int. Congr. Soil Sci. 10<sup>th</sup>*, Moscow. vol. 7. Inst. Pochvovedeniya y Agrokhimii, Moscow.
- Benayas, J., Guerra, A., Batlle, J. y Gumuzzio, J. 1988. Micromorfología de algunos suelos con acumulación de yeso en la región central española (Toledo, Ciudad Real). *Anales de Edafología y Agrobiología* 47 (1-2): 221 – 241.
- Besoain, E. 1985. Mineralogía de arcillas de suelos. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, San José, Costa Rica. 1205 pp.
- Boixadera, J., Poch, R. M., y Herrero, C. (Eds.), 1999. Soils of Catalonia and Aragon (NE Spain). Tour guide of the annual excursion of the Belgian Soil Science Society. DARP-Udl-DGA, Lleida, Spain. 243 pp.
- Boyadgiev, T. G. y Verheye, W. H. 1996. Contribution to a utilitarian classification of gypsumiferous soil. *Geoderma* 74: 321 – 338.
- Brewer, R. 1976. Fabric and mineral analysis of soils. Reprint of the ed. published by Wiley, New York. Robert E. Krieger Publishing Co., Inc. New York. 482 pp.
- Buck, B. J., y Van Hoesen, J. G. 2002. Snowball morphology and SEM analysis of pedogenic gypsum, southern New México, U.S.A. *Journal of Arid Environments* 51:469-487.
- Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerijs, A., Stoops, G., Tursina, T., y Babel, U. 1985. Handbook for soil thin section description. Waine Research Publications. 153 pp.
- Buol, S. W., Hole, F.D., McCracken, R.J., y Southard, R.J. 1997. Soil genesis and classification. Iowa State University Press / Ames, USA. Libro en internet, eBook, [www.netlibrary.com](http://www.netlibrary.com). 527pp.
- Campbell, R.S., y Foltz, I. C. 1938. Vegetation on gypsum soils of the jornada plain, New Mexico. *Ecology*, 19(4):572-577.
- CETENAL, 1972. Cartografía edafológica escala 1:50 000 y 1:250 000. SPP, México.
- Ceballos, G., Mellink, E., y Hanebury, L. 1993. Distribution and conservation status of prairie dogs (*Cynomys mexicanus* and *C. ludovicianus*) in Mexico. *Biological Conservation*, 63: 105 – 112.
- Chaufetz, H.S., y Butler, J.C. 1980. Petrology of recent caliche pisolites, spherulites, and speleothem deposits from central Texas. *Sedimentology* 27: 497 – 518.
- Chen, X.Y. 1997. Pedogenic gypcrete formation in arid central Australia. *Geoderma* 77: 39 – 61.

- Cody, R. D. 1979. Lenticular gypsum: occurrences in nature, and experimental determinations of effect of soluble green plant material on its formation. *Journal of Sedimentary Petrology*, 49(3): 1015 – 1028.
- Cody, R.D., y Cody, A. M. 1986. Gypsum nucleation and crystal morphology in analog saline terrestrial environments. *Journal of Sedimentary Petrology* 58(2): 247 – 255.
- Cody, R.D., y Cody, A.M. 1988. Gypsum nucleation and crystal morphology in analog saline terrestrial environments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 58(2): 247 – 255.
- CPCS, 1967. Clasificación francesa de suelos. Versión en español por Ortiz, S C. A., y Torrez, G. J. 1981. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Chapingo, estado de México. P: 57 - 62.
- CRM, Consejo de Recursos Minerales, 1992. Monografía geológico – minera del estado de San Luis Potosí. Publicación M-7e. Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal, Subsecretaría de Minas e Industria Básica. Gobierno del estado. 218 pp.
- CRM, Consejo de Recursos Minerales. 1996. Carta geológico – minera Matehuala F14-1, escala 1:250 000. SLP, NL, Zac y Tamps. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México.
- CRM, Consejo de Recursos Minerales. 1998. Carta geológico – minera San Luis Potosí F14-4, escala 1:250 000. SLP, Zac y Ags. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México.
- CRM, Consejo de Recursos Minerales. 1999a. Carta geológico – minera Ciudad Mante F14-5, escala 1:250 000. SLP, Tamaulipas y Veracruz. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México.
- CRM, Consejo de Recursos Minerales. 1999b. Carta geológico – minera Guanajuato F14-7, escala 1:250 000. Gto. y SLP. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, México.
- CRM, Consejo de Recursos Minerales. 1999c. Carta geológico – minera Ciudad Valles F14-8, escala 1:250 000. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. México.
- Cuanalo de la, C. H. 1979. Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. Colegio de Postgraduados, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Chapingo, México. 40 pp.

- Daunicht, H. J., Bernd, A., Jenrich, H., Struck, R., Werner, D. 1976. Capacidad de uso y manejo de los suelos del valle Matehuala - Huizache, San Luis Potosí, México. *Seminario de Postgraduados para el Desarrollo Rural*. Berlín, Alemania, 153pp.
- Dorronsoro, C., y Aguilar, J. 1988. El proceso de iluviación de arcilla. *Anales de Edafología y Agrobiología* 47 (1-2): 311 – 350.
- Dronkert, H. 1981. Enterolitic structures in a recent gypsum sediment. *I.A.S. 2nd EUR. MTG*. Bologna. P: 47 – 49.
- Estébanez, B., Ballesteros, T., Gómez, D., Fernández, M. F., Cortella, A., Alfayate, C., Marfil, R., y Ron, E. 2001. Acúmulos minerales masivos en musgos. *Bol. Soc. Esp. Briol.* 18/19: 45 – 52.
- Eswaran, H., y Zi-Tong, G. 1991. Properties, genesis, classification, and distribution of soils with gypsum. In: Nettleton W. D. Occurrence, characteristics, and genesis of carbonate, gypsum and silica accumulations in soils. *SSSA Special Publication Number 26*. Madison, Wisconsin, USA. p89-119.
- Eswaran, H., Stoops, G. y Abtahi, A. 1980. SEM morphologies of halite (NaCl) in soils. *Journal of Microscopy* 120(3): 343-352.
- Eswaran, H., Ilaiwi, M. y Osman, A. 1981. Mineralogy and micromorphology of Aridisols. P: 153-174. In: F. H. Beinroth y A. Osman (Edts.). *Proceedings third International soil classification workshop*. The Arab Center for the Studies of Arid Zones and Dry Lands, (ACSAD), Damascus, ACSAD/ SS/ P 17.
- FAO, 1990. Management of gypsiferous soils. FAO Soils Bulletin No 62. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. 81 pp.
- FAO/UNESCO, 1968. Clave de unidades de suelos para el mapa de suelos del mundo. Roma, Italia.
- FAO/UNESCO/ISRIC. 1988. Mapa mundial de suelos. Leyenda revisada. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Santiago de Compostela, España. 142 pp.
- FitzPatrick, E.A., 1980. Soils their formation, classification and distribution. Longman London. 353 pp.
- Florea, N., y Al-Joumaa, Kh. 1998. Genesis and classification of Gypsiferous soils of the Middle Euphrates Floodplain, Syria. *Geoderma* 87:67-85.
- Ford, D., y Williams, P. 1989. Karst geomorphology and hydrology. Unwim Hyman. 601 pp.

- Ford, I. N. 1984. Dinámica mineral en el suelo, algunos puntos de referencia para su estudio. Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. 577 pp.
- Franceschi, V. R., y Horner, Jr. H. T. 1980. Calcium oxalate crystals in plants. *The Botanical Review* 46(4): 361 – 427.
- García-Calderón, J. 1968. Carta geológica de México, Serie de 1:100 000, Hoja El Salado, 14R – j(11). Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.
- García-Calderón, J. 1978. Carta geológica de México, Serie de 1:100 000, Hoja Santa Rosa 14R-j(12). Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.
- Gile, L. H., Peterson, F. F., y Grossman, R. B. 1966. Morphological and genetic sequences of carbonate accumulation in desert soils. *Soil Science* 101(5): 347 – 360.
- Gómez-González, A. 1973. Ecología del pastizal *Bouteloua chasei*. Tesis de maestro en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 90 pp.
- Goss, D. W., Smith, S. J., y Stewart, B. A., 1973. Movement of added clay through calcareous materials. *Geoderma* 9:97 – 103.
- Grande-López, R. 1967. Pedogénesis de suelos calco-yesíferos del municipio de Matehuala, S. L. P. *XXX Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*, 16 – 17 octubre, Tomo II: 459 – 476.
- Grande-López, R. 1987. El yeso y sus mecanismos en el suelo. *Acta Científica Potosina*, IX(1): 30 – 50. UASLP- México.
- Grande-López, R., Hernández X. E., Aguilera, H. N., y Boulaine, J. 1967. Morfología y génesis de suelos yesíferos de Matehuala, S. L. P. *Agrociencia* 1(2): 130- 147.
- Gutiérrez-Castorena, Ma. del C. 1997. Los suelos de la ribera oriental del ex lago de Texcoco (Macro y micromorfología). Tesis de doctor en ciencias. Colegio de Postgraduados, IRENAT - Edafología, Montecillo, México. 158 pp.
- Gutiérrez, E. M., y Gutiérrez, S. F., 1996. Geomorphology of the tertiary gypsum formations in Ebro depresión, P: 1- 20. In: Poch, R. M. (ed.) *International Symposium on Soil With Gypsum*. 15-21 September. Edicions Universitat de Lleida. Lleida, Spain.
- Gutiérrez, E. M., y Gutiérrez, S. F. 1998. Geomorphology of the Tertiary gypsum formations in the Ebro Depresión (Spain). *Geoderma* 87: 1-29.

- Hamdi-Aissa, B. 2002. Paleogeochemical interpretation of some gypsic microfabrics in hyper-desert soils. *17<sup>th</sup> WCSS*, 14-21 August, Thailand, Symposium No 20, paper 1861, 9 pp.
- Hanna, F. S. y Stoops, G. J. 1976. Contribution to the micromorphology of some saline soils of the north Nile Delta in Egypt. *Pedologie*, 26(1): 55-73.
- Hay, R. L., y Wiggins, B. 1980. Pellets, ooids, sepiolite and silica in three calcretes of the southwestern United States. *Sedimentology*, 27: 559 – 576.
- Hernando, V., Sánchez Ma. P. C. y Contreras, J. G. 1963. Influencia de los niveles de yeso y de humedad en la fertilidad de un suelo yesoso. *Anales de Edafología y Agrobiología*, Tomo XXII, 7-8: 323 – 337.
- Herrero, J., y Bercero, A. 1991. La salinidad en el nuevo regadío de Quinto (Zaragoza). *Suelo y Planta*, 1: 585 – 602.
- Herrero, C., Boixadera, J., Danés, R., y Villar, J. M. 1993. Mapa de sòls de Catalunya. Hoja 360-1-2 (65-28) Bellvís. España 1:25 000. Mapa y memoria explicativa. Direcció General de Producció i Indústries Agroalimentàries. Institut Cartogràfic de Catalunya. Barcelona. 198 pp.
- Herrero, J. 1991. Morfología y génesis de suelos sobre yesos. Monografías INIA No 77. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Madrid, España. 447 pp.
- Herrero, J. 2004. Revisiting the definitions of gypsic and petrogypsic horizons in Soil Taxonomy and World Reference Base for Soil Resources. *Geoderma* 120: 1 – 5.
- Herrero, J. y Boixadera, J. 2002. Gypsic soils. *Enciclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker, Inc. P: 635 – 639.
- Herrero, J., y Porta, J. 1987. Gypsiferous soils in the north east of Spain. P. 187 – 192. In N. Fédoroff, N., Bresson, L. M., y Courty, M. A. (Eds) Soil micromorphology. Assoc. Francaise pour l'Etude du Sol, Plaisir, France.
- Herrero, J., Porta, J., y Fédoroff, N. 1992. Hypergypsic soil micromorphology and landscape relationships in Northeastern Spain. *Soil Science Society American Journal* 56: 1188-1194.
- Herrero, J., y Porta, J. 2000. The terminology and the concepts of gypsum-rich soils. *Geoderma* 96: 47-61.
- Hillel, D. 2000. Salinity management for sustainable irrigation. Integrating science, environment, and economics. Environmentally and Socially Sustainable Development. The World Bank, Washington, D. C. 92 pp.

- Huguet del Villar, E. 1929. Geobotánica. Editorial Labor, S.A. Barcelona, España. 339 pp.
- INEGI, 1981. Cartografía temática de la carta F 14-A 43, escala 1:50 000. SPP. México.
- Jackson, E. C., Krogh, S. N., y Whitford, W. G. 2003. Desertification and biopedturbation in the northern Chihuahuan Desert. *Journal of Arid Environments* 53: 1 – 14.
- Jafarzadeh, A. A., y Burnham, C. P. 1992. Gypsum crystals in soils. *Journal of Soil Science*, 43: 409 - 420.
- Jafarzadeh, A.A. 2002. laboratory studies of evaporation rate in gypsiferous soils in relation to: time, water table, textura, and treatments. *International Conference on Sustainable Land Use and Management*. [www.toprak.org.tr/isd/isd\\_68.htm](http://www.toprak.org.tr/isd/isd_68.htm).
- Jaillard, B., Guyon, A., y Maurin, A. F. 1991. Structure and composition of calcified roots, and their identification in calcareous soils. *Geoderma* 50: 197 – 210.
- Jakucs, L. D. Sc. 1977. Morphogenetics of karst regions. Variants of karst evolution. Adam Hilger Ltd, Bristol, Hungary. 284 pp.
- Johnston, I. M. 1941. Gypsophily among mexican desert plants. *Journal of the Arnold Arboretum* 22(2): 145 – 170.
- Khademi, H., y Mermut, A.R. 2003. Micromorphology and classification of argids and associated gypsiferous Aridisols from central Iran. *Catena* 54: 439 – 455.
- Klappa, C. F. 1979. Lichen stromatolites: criterion for subaerial exposure and a mechanism for the formation of laminar calcretes (caliche). *Journal of Sedimentary Petrology* 49(2): 387 – 400.
- Klima, W. F., y Nancollas, G. H. 1987. The growth of gypsum. *AIChE Symposium Series*, No 253, Vol 87: 23 – 30.
- Kocurek, G., y Hunter, R. E. 1986. Origen of polygonal fractures in sand, uppermost Navajo and Page Sandstones, Page, Arizona. *Journal of Sedimentary Petrology*, 56(6): 895 – 904.
- Kubiëna, W. L. 1952. Claves sistemáticas de suelos. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Instituto de Edafología y Fisiología Vegetal, Madrid, España. 388 pp.
- Lagunes-Espinoza, L. del C. 1985. Caracterización química de una serie de suelos ígneos, calcáreos y yesosos del Altiplano Potosino - Zacatecano. Tesis profesional, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana.

- López-Ramos, E. 1973. Carta Geológica del Estado de San Luis Potosí. 2<sup>da</sup> edición. Escala 1:500 00. Instituto de Geología de la UNAM, México, D. F.
- López-Ramos, E. 1976. Geología de México, Tomo II. Tercera edición. México, D. F. 446 pp.
- Lu, F. H., Meyers, W. J., Hanson, G. N. 2002. Trace elements and environmental significance of Messinian gypsum deposits, the Nijar Basin, southeastern Spain. *Chemical Geology* 192:149 – 161.
- Lu, F. H., Meyers, W. J., y Schoonen, M. A. A. 1997. Minor and trace element analyses on gypsum; an experimental study. *Chemical Geology* 142: 1 – 10.
- Machín, J., y Navas, A. 1998. Spatial analysis of gypsiferous soils in the Zaragoza province (Spain), using GIS as an aid to conservation. *Geoderma*, 87: 57 – 66.
- MacKenzie, W.S., y Guilford, C. 1996. Atlas de petrografía, minerales formadores de rocas en lámina delgada. Traducción de Lago, Sn. J. M., y Arranz Y. E. Masson, S. A. Madrid. 98 pp.
- MacKenzie, W. S., y Adams, A. E. 1997. Atlas en color de rocas y minerales en lámina delgada. Traducción de Lago, Sn. J. M., y Arranz Y. E. Masson, S. A. Madrid. 215 pp.
- Magee, J. W. 1991. Late Quaternary lacustrine, groundwater, aeolian and pedogenic gypsum in the Prungle Lakes, southeastern Australia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 84: 3 – 42.
- Mashali, A. M. 1996. Soil management practices for gypsiferous soils. In: Poch, R. M. (ed.) *Proceedings of the International Symposium on Soil with Gypsum*. 15-21 September. Edicions Universitat de Lleida. Lleida, Spain. P: 34 – 52.
- Mees, F. 1999a. Distribution patterns of gypsum and kalistronitite in a dry lake basin of the southwestern Kalahari (Omongwa Pan, Namibia). *Earth Surface Processes and Landforms* 24; 731 – 744.
- Mees, F. 1999b. The unsuitability of calcite spherulites as indicators of subaerial exposure. *Journal of Arid Environments* 42: 149 – 154.
- Mellink, E. 1989. La erosión del suelo como una amenaza para las colonias de perro llanero, en el norte de San Luis Potosí. P: 68 – 76. *VII Simposio sobre Fauna Silvestre, Memorias*. UNAM, México.
- Mellink, E., y Madrigal, H. 1993. Ecology of mexican prairie dogs, *Cynomys mexicanus*, in el Manantial, northeastern Mexico. *Journal of Mammalogy*, 74(3): 631 – 635.

- Meyer, E. S. 1986. The ecology of gypsophile endemism in the eastern Mojave desert. *Ecology*, 67: 1303 – 1313.
- Meyer, E. S. y García-Moya E. 1989. Plant community patterns and soil moisture regime in gypsum grasslands of North Central Mexico. *Journal of Arid Environments*. 16: 147 - 155.
- Meyer, E. S., García-Moya, E. y Lagunes-Espinoza, L. C. 1992. Topographic and soil surface effects on gypsophile plant community patterns in central México. *Journal of Vegetation Science* 3: 429 - 438.
- Monje, P. V., y Baran, E. J. 2002. Characterization of calcium oxalates generated as biominerals in cacti. *Plant Physiology* 128: 707 - 713.
- Mottana, A. Crespi, R., y Liborio, G. 1975. Guía de minerales y rocas. Grijalbo, Barcelona, España. p: 117, 334.
- Navas, A., y Machín, J. 1997. Assessing erosion risks in the gypsiferous steppe of Litigio (NE Spain). An approach using GIS. *Journal of Arid Environments* 37: 433 – 441.
- Nunes, F. J. 1984. El mejoramiento de los suelos sódicos y aguas bicarbonatadas utilizando yeso agrícola en diferentes láminas de aplicación. Tesis de M. C. Colegio de Postgraduados, México.
- Ortiz-Solorio, C. A. y Gutiérrez-Castorena, Ma. C. 2000. Situación actual y perspectivas de la clasificación de suelos en México. P 18 – 31. In: Quintero-Lizaola, R., Reyna-Trujillo, T., Corlay-Chee, L., Ibañez-Huerta, A., y García-Calderón, N. E. (Eds.) *La edafología y sus perspectivas al siglo XXI*. Tomo I. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, UNAM, UACH, México.
- Ortlieb, L., y Pierre C. 1981. Génesis evaporítica en tres áreas supralitorales de Baja California; contextos sedimentarios y procesos actuales. *Revista del Instituto de Geología*, Universidad Nacional Autónoma de México. 5(1): 94 – 116.
- Oyarbide, F. Osterrieth, M. L. y Cabello M. 2001. *Trichoderma koningii* as a biomineralizing fungous agent of calcium oxalates in typical Argiudolls of the Los Padres Lake natural reserve (Buenos Aires, Argentina). *Microbiological Research* 156: 113-119.
- Perkins, D., y Henke, R. K. 2002. Minerales en lámina delgada. Traducción de Manuel Pozo Rodríguez. Prentice Hall. Madrid. 139 pp.

- Pineda-Mares, P. 2001. Respuesta del maíz al fósforo y un mejorador de suelos en áreas yesosas de la Zona Media de San Luis Potosí. Tesis de licenciatura, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, UACh. 65 pp.
- Poch, R. M. 1992. Fabric and physical properties of soils with gypsum and hypergypsic horizons of the Ebro Valley. Ph. D. Thesis. U. Ghent. 285 pp.
- Poch, R. M., De Coster, W. y Stoops, G.. 1998. Pore space characteristics as indicators of soil behaviour in gypsiferous soils. *Geoderma*. 87: 87-109.
- Porta, J., López-Acevedo, M., y Roquero, C. 1977. Morfometría y clasificación de algunos Gypsiorthids en España. *Anales INIA*, Serie General 5: 85 – 111.
- Porta, J. 1986. Edafogénesis en suelos yesíferos en medio semiárido. Documento fotocopiado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Lérida, 136p.
- Porta, J., y Herrero, J. 1988. Micromorfología de suelos con yeso. *Anales de Edafología y Agrobiología*. T. XLVII (1-2): 179 – 197.
- Porta, J., López-Acevedo, M., y Roquero, C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3ª edición. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España. 929 pp.
- Quirantes, P. J. 1978. Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario Continental de los Monegros. Instituto Fernando el Católico, Zaragoza, España. 207 pp.
- Rossi, C., y Cañaveras, J. C. 1999. Pseudospherulitic fibrous calcite in paleo-groundwater, unconformity-related diagenetic carbonates (Paleocene of the Ánger basin and Miocene of the Madrid basin, Spain). *Journal of Sedimentary Research* 69(1): 224 – 238.
- Russ, J., Russell, L. P., Loyd, D. H., Frawell, D. W., y Edwards, H. G. M. 1995. Analysis of the rock accretions in the Lower Pecos Region of Southwest Texas. *Geoarchaeology: An International Journal* 10(1): 43-63.
- Russ, J., Palma, R. L., Loyd, D. H., Boutton, T. W., y Coy, M. A. 1996. Origin of the whewellite-rich rock crust in the Lower Pecos Region of Southwest Texas and its significance to paleoclimate reconstructions. *Quaternary Research* 46: 27-36.
- Saad, A.M. 1960. Tratado de construcción, tomo primero. CECSA, México. P: 167 – 176.
- Sánchez, D. J., Benayas, J., y Guerra, A. 1978. Estudio morfológico y micromorfológico de los horizontes argílicos de las zonas árida y subhúmeda de Gran Canaria (I. Canarias). *Proceedings of the fifth International Working on Soil Micromorphology*, Granada, España, 2: 1067 – 1092.

- Schoeneberger, P.J., Wysocki, D.A., Benham, E.C., y Broderson, W.D. (editors), 2002. Field book for describing and sampling soils, Version 2.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- SEMARNAP, 1999. Mapa de suelos dominantes (FAO/UNESCO/ISRIC, 1988). Primera aproximación, escala 1:4000 000. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, México.
- Soil Survey Staff, 1960. Soil classification, a comprehensive system, 7th approximation. U.S. Government Printing Office, Washington, D. C. 265 pp.
- Soil Survey Staff, 1975. Soil taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. USDA Agriculture Handbook. 436. Washington, D. C. 754 pp.
- Soil Survey Staff, 1990. Keys to soil taxonomy. Fourth Edition. SMSS Technical Monograph No 19. Blacksburg, Virginia. 422 pp.
- Soil Survey Staff, 1994. Claves para la taxonomía de suelos. Traducción de Ortiz-Solorio C. A. y Gutiérrez-Castorena M. C. CEDAF-CP, Montecillo, México.
- Soil Survey Staff, 1999. Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2<sup>a</sup> ed. USDA Agriculture Handbook. 436. Washington, D. C. 869 pp.
- Soil Survey Staff, 2003. Keys to soil taxonomy. Ninth edition. USDA, Washington, D. C. 332 pp.
- Soria-Colunga, J., Dixon, J., White, N., Guerra, A., y Hallmark, C. T. 2000. Presencia de sepiolita en un suelo de las zonas áridas de San Luis Potosí. P: 89 – 93. In: Quintero-Lizaola, R., Reyna-Trujillo, T., Corlay-Chee, L., Ibañez-Huerta, A., y García-Calderón, N. E. (Eds.) *La edafología y sus perspectivas al siglo XXI*. Tomo I. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, UNAM, UACH, México.
- Soria-Colunga, J. 2004. Génesis, morfología y clasificación de suelos derivados de yeso y caliza en los municipios de Guadalcázar, Villa Hidalgo y Villa Juárez, S.L.P. Tesis de Maestría en Ciencias, Facultad de Ciencias, UNAM, México, D.F. 182 pp.
- Stoops, G. 1986. The future of micropedology.. In: *Pedology XXX-3*, p 225 – 233. *International Bulletin*, Belgian Society of Soil Science, Ghent.
- Stoops, G. e Ilaiwi, M. 1981. Gypsum in arid soils morphology and genesis. P: 175 – 185. In: F. H. Beinroth y A. Osman (Edts.). *Proceedings Third International Soil Classification Workshop*, Damascus, ACSAD/ SS/ P 17.

- Stoops, G. 2003. Guidelines for analysis and descriptions of soil and regolith thin sections. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA. 184 pp.
- Sullivan, L. A. 1990. Micromorphology and genesis of some calcite pseudomorphs after lenticular gypsum. *Australian Journal of Soil Research* 28: 483 – 485.
- Tavarez-Espinosa, C. A. 1996. Estimación de los datos de laboratorio requeridos por el sistema USDA (versión 1994) para el sur-este de México. Tesis de M C, CP, Montecillo, México. 111 pp.
- Tchakerian, P. V. 2000. North America. P: 523 – 541. In: Thomas, D. S. G. (Ed.) Arid zone geomorphology. Process, form and change in drylands. Second edition. John Wiley & Sons. 713 pp.
- Terrazas-Astorga, J. M. 1985. Respuesta del jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) a la nutrición de K, Ca y Mg en un suelo yesoso de Guadalcázar, SLP, bajo condiciones de invernadero. Tesis profesional, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, UACH., México.
- Toomanian, N., Jalalian, A., y Eghbal, M. K. 2003. Application of the WRB (FAO) and US Taxonomy Systems to gypsiferous soils in Northwest Isfahan. *Iran. J. Agric. Sci. Technol.* 5: 51 – 66.
- Tucker, M. E. 1978. Gypsum crusts (gypcrete) and patterned ground from northern Iraq. *Zeitschrift für Geomorphologie N. F.* 22(1): 89 – 100.
- Toulkeridis, T., Podwojewski, P., y Clauer, N. 1998. Tracing the source of gypsum in New Caledonian soils by REE contents and S-Sr isotopic compositions. *Chemical Geology* 145; 61 – 71.
- Urias-Rodríguez, A. 1965. Estudio geológico de la Sierra de Guadalcázar. *Folleto técnico* No 8. Instituto de Geología y Metalurgia, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, SLP, México. 35 pp.
- Van Hoesen, J. G., Buck B. J., Merkeler, D. J., y McMillan N. 2001. An investigation of salt micromorphology and chemistry, Las Vegas Wash, Nevada. *Proceedings, 36<sup>th</sup> Annual Symposium on Engineering Geology and Geotechnical Engineering*. P. 729-737. Luke, J. Y Werle (eds) University of Nevada, Las Vegas, March 28-30, 2001.
- Van Hoesen, J. G. 2000. Pedogenic gypsum in Southern New Mexico: genesis, morphology, and stable isotopic signature. Ms. C. Graduate College, University of Nevada, Las Vegas. UMI number 1401782. 182 pp.

- Van Reeuwijk, L. P. (Ed.) 1999. Procedimientos para análisis de suelos, versión 1995. Traducción de: Gutiérrez-Castorena, Ma del C., Tavarez-Espinosa, C. A., y Ortiz-Solorio, C. A. Primera edición en español. Especialidad de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 145 pp.
- Verrecchia, E. P. 1990. Litho-diagenetic implications of the calcium oxalate-carbonate biogeochemical cycle in semiarid calcretes, Nazareth, Israel. *Geomicrobiology Journal* 8: 87-99.
- Verrecchia, E. P., Dumont J. L., y Rolko K. E. 1990. Do fungi building limestones exists in semi-arid regions? *Naturwissenschaften* 77: 584-586.
- Verrecchia, E. P., Freytet, P., Verrecchia, K.E., y Dumont, J.L. 1995. Spherulites in calcrete laminar crusts: biogenic CaCO<sub>3</sub>, precipitation as a major contributor to crust formation. *Journal of Sedimentary Research* A65(4): 690 – 700.
- Vizcayno, C., García-González, M. T., Gutiérrez, M. y Rodríguez, R. 1995. Mineralogical, chemical and morphological features of SALT accumulations in the Flumen-Monegros district, NE Spain. *Geoderma* 68(3): 193 – 210.
- Vonder Haar, S. P., y Gorsline, D. S. 1975. Flooding frequency of hypersaline coastal environments determined by orbital imagery: geologic implications. *Science* 190: 147-149.
- Wadsten, T., y Moberg, R. 1985. Calcium oxalate hydrates on the surface of lichens. *Lichenologist* 17(3): 239-245.
- Watson, A. 1979. Gypsum crusts in deserts. *Journal of Arid Environments* 2: 3 – 20.
- Watson, A. 1985. Structure, chemistry and origins of gypsum crusts in southern Tunisia and the central Namib Desert. *Sedimentology*, 32: 855 – 875.
- Watson, A. 1988. Desert gypsum crusts as palaeoenvironmental indicators: A micropetrographic study of crusts from southern Tunisia and the central Namib Desert. *Journal of Arid Environment* 15: 19 – 42.
- Watson, A., y Nash, J. D., 1997. Desert crusts and varnishes. In: Thomas, S. G. D. Arid zone geomorphology, process, form and change in dry lands. 2<sup>nd</sup> edition. John Wiley and Sons. P: 69 - 107.
- Wieder, M., y Yaalon, D.H. 1978. Grain cutans resulting from clay illuviation in calcareous soil materials. In: Delgado, M (Ed.) Micromorfología de suelos 2: 1133 – 1158. *Proceeding of the Fifth International Working Meeting on Soil Micromorphology*. Universidad de Granada, España.

- Wild, A. (Coordinador) 1992. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Rusell. Versión española de Urbano, T. P., y Rojo, H. C. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España. 1045 pp.
- WRB, 1999. Base referencial mundial del recurso suelo. Informes sobre recursos mundiales de suelos No 84. FAO, SICS-AISS-IBG, ISRIC, Roma. 93 pp.
- Wright, V. P., Beck, V. H., y Sanz-Montero, M. E., 1996. Spherulites in calcrete laminar crusts: biogenic CaCO<sub>3</sub>, precipitation as a major contributor to crust formation-discussion. *Journal of Sedimentary Research* 66(5): 1040 – 1041.  
[www.uam.es/informacion/asociaciones/SEB/vol18-19/e-minerales.pdf](http://www.uam.es/informacion/asociaciones/SEB/vol18-19/e-minerales.pdf)

## **CAPÍTULO V. CONCLUSIONES GENERALES.**

Se han cartografiado a escala 1:100 000 las áreas yesosas del estado de San Luis Potosí. Esta actualización de los mapas existentes ha reconocido nuevas áreas ricas en yeso y ha descartado otras hasta el momento cartografiadas como tales.

Se constató que las imágenes de satélite Landsat ETM y especialmente las bandas 1, 5, 6 y 7, son de utilidad en la discriminación de las tierras ricas en yeso y litologías yesosas. Asimismo la transformación del nivel digital de la banda del infrarrojo térmico a temperatura superficial permitió discriminar áreas con materiales yesosos.

Se ha actualizado la clasificación de los suelos yesosos según Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999) y la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB, 1999). En el primer sistema los suelos se clasifican como Aridisoles y en el segundo como Gipsisoles, Kastanozems y Solonchaks. Se discuten aspectos comparados de la clasificación de los pediones en ambos sistemas.

Se describió la micromorfología de los suelos ricos en yeso, poco conocida hasta la fecha para este tipo de suelo en México. El estudio de secciones delgadas de suelo y el análisis por difracción de rayos X permitieron conocer la mineralogía de suelos yesosos. El análisis micromorfológico también hizo posible conocer el grado de acumulación de yeso asociado al uso de agua sulfatada en el riego.

Los principales edaforrasgos son de disolución-recristalización de yeso en forma de revestimientos, rellenos y nódulos; de descalcificación asociada a la actividad de raíces y flujo preferente de agua; de recristalización de calcita a veces asociada a áreas con descalcificación; de actividad de la biota; revestimientos de microesparita; y nódulos limo-carbonáticos.

El enfoque multiescala adoptado en este trabajo ha permitido: actualizar la cartografía, constatar la utilidad de los sensores remotos, conocer la micromorfología y mineralogía y actualizar la taxonomía de las áreas yesosas del estado de San Luis Potosí, y dar una interpretación coherente a los resultados.